

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Liberec 2009/2010

LENKA REJMANOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Studijní program: N3108 Průmyslový management

Studijní obor: Management jakosti

**VYUŽITÍ ODPADŮ KRÁTKÝCH ČEDIČOVÝCH
VLÁKEN PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY**

**UTILIZATION OF SHORT BASALT FIBER
WASTE IN COMPOSITE MATERIALS**

Lenka Rejmanová

KHT-020

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Kovačič

Rozsah práce:

Počet stran textu ...79

Počet obrázků43

Počet tabulek72

Počet grafů.....11

Počet stran příloh...34

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te literární rešerši na téma výroby a vlastností krátkých čedičových vláken. Rešerši dále zaměřte na konstrukci a vlastnosti kompozitních materiálů.
2. Navrhněte a realizujte experiment ověření konstrukce a vlastností kompozitních materiálů s použitím odpadů z výroby krátkých čedičových vláken a různých matric.
3. Proved'te statistické zpracování výsledků a jejich diskuzi.

PROHLÁŠENÍ

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL po předchozím souhlasu zadavatele DP.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci dne 5.5.2010

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Vladimíru Kovačičovi za pomoc, odborné rady, čas a vynaloženou energii.

Dále bych velice ráda poděkovala společnosti Sait-Gobain Isover Častolovice CZ s.r.o. za poskytnutí materiálu potřebného k uskutečnění mé diplomové práce. Můj dík patří všem zaměstnancům z této společnosti, kteří mi při uskutečňování mé práce ochotně pomáhali.

Dále bych touto cestou ráda poděkovala Ing. Ireně Dorazilové ze zkušební laboratoře Qualiform v Hradci Králové, kde byly prováděny zkoušky betonů. Za odbornou pomoc a rady při vykonávání těchto zkoušek děkuji Ing. Václavu Sodomovi a Pavlu Špryňarovi.

Velký dík patří také mému příteli a celé mé rodině za podporu a pomoc po celou dobu mého studia.

ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá využitím odpadové čedičové vlny do kompozitu. Do betonu se dnes s úspěchem přidávají technická vlákna, která zlepšují některé vlastnosti výsledného vláknobetonu. Z tohoto důvodu je experiment navržen tak, že je odpadový materiál přimícháván do betonové směsi v různých poměrech a jsou zkoumány vlastnosti (především pevnost) výsledného betonu.

V teoretické části jsou popsány pojmy, které se tohoto tématu týkají. Jsou zde vysvětleny a popsány kompozity, čedič a čedičová vlákna, dále jsou zde popsána anorganická vlákna a také je zde krátká rešerše týkající se betonu.

V experimentální části jsou navrženy dva experimenty. V prvním experimentu je odpadová čedičová vlna přidávána do potěrového betonu. Druhá část experimentu zkoumá využití odpadu v záměsech s běžným betonem.

KLÍČOVÁ SLOVA:

- kompozity
- čedičové vlákno
- beton
- vláknobeton
- pevnost

ANNOTATION

This thesis deals with utilization of basalt wool waste in composites. Nowadays technical fibres are added into concrete successfully because they improve some properties of the resultant fibre concrete. For this reason an experiment is proposed in that waste material is admixed into concrete mixture at various ratios and properties of the resultant concrete (above all strength) are examined.

Some ideas which refer to the topic are described in the theoretical part. Composites, basalt and basalt fibers are explained and described here and furthermore inorganic fibers are described and a short exploration referring to concrete is involved as well.

In the experimental part two experiments are proposed. In the first experiment basalt wool is added into the concrete cover. The other experiment investigates utilization of waste together with standard concrete.

KEYWORDS:

- composites
- basalt fiber
- concrete
- fibreconcrete
- strength

Obsah

Úvod	11
1 Kompozity	12
1.1 Synergický efekt	13
1.2 Klasifikace kompozitů	13
1.2.1 Klasifikace kompozitů podle druhu matrice	13
1.2.2 Klasifikace kompozitů podle druhu výztuže	14
1.3 Textilní vlákna pro kompozity	14
1.4 Používané vláknenné produkty pro kompozitní výztuž	15
1.5 Vlastnosti vláknových kompozitů	16
1.5.1 Přehled základních vlastností vláknových kompozitů	16
1.6 Nevýhody kompozitů	17
1.7 Použití kompozitů	17
1.7.1 Použití kompozitů ve stavebnictví	18
1.7.2 Použití čediče a čedičových vláken ve stavebnictví	18
1.7.3 Použití čedičových vláken jako výztuž do betonu	19
2 Rozdělení anorganických vláken	20
2.1 Vlákná s vysokou tepelnou odolností	20
2.2 Vysoce pevná vlákna	20
2.3 Vlákná s vysokým počátečním modulem	21
3 Čedič	22
3.1 Složení čediče	22
3.2 Čedičová vlákna	23
3.2.1 Historický vývoj horninových vláken	23
3.2.2 Výroba čedičových vláken	24
3.2.2.1 Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken	24
3.2.2.2 Technologie výroby krátkých čedičových vláken	25
3.2.3 Vlastnosti čedičových vláken	25
3.2.4 Čedičová vlákna a životní prostředí	26
4 Beton	27
4.1 Složky betonu	27
4.1.1 Přísady	28

4.1.2 Příměsi	28
4.2 Základní požadavky na beton	28
4.3 Vlastnosti betonů	29
4.4 Základní rozdělení betonů	30
4.4.1 Rozdělení betonů podle objemové hmotnosti	30
4.4.2 Rozdělení betonů podle vyztužení.....	30
4.4.3 Rozdělení betonů podle hutnosti	30
4.4.4 Rozdělení betonů podle pevnosti.....	31
4.5 Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu	32
4.5.1 Základní destruktivní zkoušky.....	32
4.5.4.1 Zkouška pro stanovení tlakové pevnosti betonu – krychelná pevnost	32
4.5.4.2 Zkouška pro stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles – zatěžování jedním břemenem uprostřed	33
5 Sait-Gobain Isover Častolovice CZ s.r.o.	36
5.1 Historie společnosti	36
5.2 Výroba čedičové izolace.....	36
5.3 Recyklace odpadového materiálu	38
6 Experimentální část.....	39
6.1 Návrh celého experimentu.....	39
6.2 Záměsí potěrového betonu a odpadové čedičové vlny	39
6.2.1 Potěrový beton firmy Weber	39
6.2.2 Návrh experimentu s potěrovým betonem firmy Weber	40
6.2.3 Poměry záměsí potěrového betonu a odpadu čedičové vlny	41
6.2.4 Míchání záměsí.....	41
6.2.5 Formy	43
6.2.6 Odbedňování (odformování)	44
6.2.7 Zrání vyrobených těles	44
6.2.8 Zkoušky ztvrdlého betonu prováděné na záměsech potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou	45
6.2.8.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou	45
6.2.8.2 Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku	47
6.2.8.3 Zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles	51

6.3 Záměsí běžného betonu a odpadové čedičové vlny	54
6.3.1 Běžný beton	54
6.3.2 Návrh experimentu s běžným betonem	54
6.3.3 Poměry běžného betonu a odpadu čedičové vlny.....	55
6.3.4 Míchání záměsí.....	56
6.3.5 Formy	57
6.3.6 Hutnění	58
6.3.7 Odformování.....	59
6.3.8 Zrání vyrobených těles	59
6.3.9 Zkoušky čerstvého betonu prováděné na záměsech běžného betonu s odpadem čedičové vlny	59
6.3.9.1 Konzistence čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadem.....	59
6.3.9.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadem	61
6.3.9.3 Obsah vzduchu čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadem.....	63
6.3.10 Zkoušky ztvrdlého betonu prováděné na záměsech běžného betonu s odpadem čedičové vlny.....	64
6.3.10.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu záměsí běžného betonu s odpadem	65
6.3.10.2 Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku	66
6.3.10.3 Zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles	69
6.3.10.4 Měření součinitele tepelné vodivosti	71
7 Závěr	75
Použitá literatura	77
Seznam příloh	79

Seznam použitých symbolů a jednotek

Al_2O_3	oxid hlinitý
CaO	oxid vápenatý
MgO	oxid hořečnatý
SiO_2	oxid křemičitý
f_c	pevnost v tlaku [MPa]
f_{cf}	pevnost v tahu ohybem [MPa]
λ	součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

Seznam a objasnění betonářských pojmů

hutnění - mechanická metoda zvyšování hustoty vyrobené záměsi, cílem je odstranit nežádoucí vzduchové póry a zamezit sesednutí, ale také má za úkol vytvořit takovou strukturu betonu, jejíž vlastnosti budou v celém betonu stejnorodé

konzistence – stanovením konzistence se charakterizuje zpracovatelnost čerstvé betonové záměsi

vodní součinitel – poměr obsahu vody k hmotnosti cementu

záměs – množství betonu stejného složení namíchané při jednom míchání v míchačce

odbedňování – odstranění všech částí dřevěných forem ze zkušebních těles po 16 hodinách od výroby

odformování – vyjmutí zkušebních těles z forem po 16 hodinách od výroby

Úvod

Problematika odpadů je v dnešní době velice rozšířené a diskutované téma. Bohužel stále velké množství firem dává přednost odvozu odpadu na skládku před vývojem nových výrobků z recyklovaného odpadu. Důvod této volby je čistě ekonomický. Skládkování je nejekonomičtější volbou, ale bohužel není volbou ekologickou. Skládkování odpadu představuje problém enviromentální, ale také etický. Velice častá je i typická nerudovská otázka: „Kam s ním“. Skládky zabírají velkou část území, která se z kapacitních důvodů stále rozšiřuje. Na skládky se sice vyváží tzv. tříděný odpad a po vyčerpání kapacity je zavážena hlínou, aby dále nenarušovala krajinný ráz, ale vzniklá plocha nemůže být dále využita k dalším účelům. Z těchto důvodů je zapotřebí, aby se snižovalo ukládání odpadů ve formě nevyužitých surovin na skládky a rozvíjelo se recyklování nových či inovovaných produktů.

Cílem této diplomové práce je najít vhodné uplatnění odpadové čedičové vlny v kompozitech. Velice rozšířeným kompozitem je beton, do kterého jsou s úspěchem přidávána různá technická vlákna, která ovlivňují některé vlastnosti betonu. Z tohoto důvodu byla experimentální část zaměřena na vmíchávání odpadové čedičové vlny v rozdílných dávkách do betonové směsi a následně byly zkoumány vlastnosti vzniklého betonu. Nejprve byly provedeny zkoušky čerstvého betonu. Byla měřena konzistence, objemová hmotnost a obsah vzduchu. Dále byly prováděny zkoušky ztvrdlého betonu. Mezi zkoumané vlastnosti patřila především pevnost betonu v tlaku a v tahu ohybem zkušebních těles a dále byl měřen součinitel tepelné vodivosti. Na závěr byly zjištěné výsledky vyhodnoceny a byla sepsána následná doporučení.

1 Kompozity

Kompozity jsou heterogenní materiály. Jsou vyrobeny ze dvou nebo více složek, které mají odlišné vlastnosti (chemické, fyzikální a mechanické). Každá složka si však musí v kompozitu zachovat své vnitřní vlastnosti. Kompozity jsou složeny z **matrice** a **výztuže**. Výztuží je nazývána složka, která je tvrdší, pevnější, tužší a obvykle je nespojitá. Tato složka má lepší mechanické vlastnosti oproti složce druhé. Matrice zastává funkci pojiva výztuže, je to spojitá a obvykle poddajnější složka. [23]

Kompozity mohou být jednovrstvé nebo mnohovrstvé. Mezi mnohovrstvé kompozity patří lamino, laminát a hybridní laminát. Lamino je jedna vrstva vícevrstvého vláknového kompozitu. Laminát je vláknový kompozit, který je tvořen více vrstvami. Materiály složek kompozitu jsou v každé vrstvě shodné. Laminát je tedy kompozit z několika lamin. Hybridní laminát je také tvořen více vrstvami, jednotlivé vrstvy jsou tvořeny z různých složek. [18, 24]

Aby byl vícefázový materiál chápán jako kompozit musí být splněny následující podmínky:

- mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti výztuže a matrice se liší, výztuž je pevnější v tahu a je tužší než matrice
- podíl výztuže musí být v kompozitu vyšší než 5 %

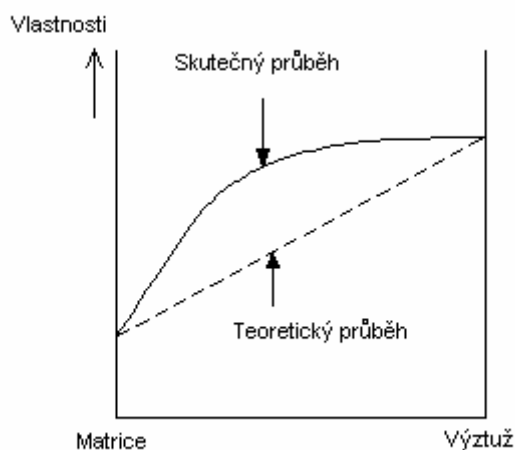
Vlastnosti výsledného kompozitu jsou vyšší, než když se jednotlivé vlastnosti sečtou. Pro kompozitní materiály je tedy charakteristický **synergický efekt**. (viz kapitola 1.1).

V textilním průmyslu jsou jako výztuž nejčastěji používána vlákna čedičová, kovová, uhlíková, skleněná, keramická atd.

Na českém i světovém trhu se neustále objevují nové druhy kompozitů, které jsou inovovány z kompozitů současných nebo jsou vyvinuty z nových materiálů a struktur. [23]

1.1 Synergický efekt

Slovo synergie pochází z řeckého *syn* – *ergazomai* a v překladu znamená spolupracovat, spolupráce nebo také společné působení. Synergický efekt vzniká, když jednotlivé složky navzájem spolupracují, tj. alespoň jedna vlastnost kompozitu je vyšší než pouhá sumace vlastností všech složek v kompozitu. Tento efekt lze vysvětlit jako situaci, kdy výsledný celek vlastností je vyšší než pouhý součet vlastností jednotlivých složek. Platí tedy, že $1+1=3$. [24] Synergický efekt je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Průběh synergického efektu

1.2 Klasifikace kompozitů

Třídění neboli klasifikaci kompozitů je možné vytvořit podle těchto hledisek:

- podle druhu matrice,
- podle druhu výztuže.

1.2.1 Klasifikace kompozitů podle druhu matrice

- anorganická matrice – např. beton, železobeton atd.
- polymerní matrice – elastomerní, termoplastická atd.
- keramická matrice – cernety (tj. keramické kompozity, které jsou vyztuženy kovovými vlákny)
- kovová matrice [24]

1.2.2 Klasifikace kompozitů podle druhu výztuže

- **Částicové výztuže** – nebo také partikulované výztuže. U těchto kompozitů nepřesahuje jeden rozměr útvarů výztuže rozměry ostatní. Tvar těchto částic tedy může být např. destičkový, kulovitý, tyčinkovitý, ale i nepravidelný. Částice mohou být izometrické a anizometrické s náhodnou či preferovanou orientací. Klasickým příkladem částicového kompozitu je beton. [11]

- **Vláknové výztuže** – nebo také fibrilární. Zde je jako výztuž použit materiál, u kterého výrazně převažuje jeden rozměr oproti zbývajícím dvěma rozměrům. Výztuž těchto kompozitů může být tvořena vlákny. Mohou být použita vlákna krátká nebo dlouhá. Orientace těchto vláken může být nahodilá či uspořádaná. Pro vláknové kompozity se používá označení FRC z anglického fiber reinforced composites. [11]

- **Kombinované výztuže** – výztuž kompozitů je tvořena z vláken i částic. [11]

Různé druhy vláknových kompozitů jsou znázorněny na obr. 2.



Obr. 2 Druhy vláknových kompozitů – částicový, s krátkými a dlouhými vlákny

1.3 Textilní vlákna pro kompozity

Pro kompozity s textilní výztuží se používají vlákna čedičová, uhlíková, keramická, skleněná, bórová, kovová, polymerní, proteinová, rostlinná atd. Pro tato vlákna jsou specifické vlastnosti, mezi které patří vysoká tuhost, pevnost a teplotní stabilita. Tato vlákna bývají nejčastěji pojena polymerní matricí.

Textilní vlákna se používají do kompozitů pro zesílení, zvyšují zde tuhost (resp. modul) a snižují tepelnou roztažnost a hmotnost výsledných výrobků.

Textilní kompozity jsou zesíleny kontinuálními či krátkými vlákny. Vláknové kompozity obsahují vlákna o průměru 1–100 μm . Někdy se používají vlákna o průměru nižším než 1 μm , tyto kompozity se zařazují mezi nanokompozity. [18, 24]

1.4 Používané vláknenné produkty pro kompozitní výztuž

- sekané prameny – jsou určeny pro přípravu vstřikovacích a lisovacích směsí, potřebná délka pramenu vznikne jeho nasekáním
- mletá vlákna – lze je vyrobit pouze z křehkých vláken, tato vlákna jsou vyrobena mletím
- rovingy (kabílky, pramence)
 - prameny sdružené bez zákrutů nebo s malým počtem zákrutů (méně než 40 $\text{z} \cdot \text{m}^{-1}$)
 - rovingy dodávané na válcových cívkách o větší hmotnosti
 - rovingy dodávané na menších cívkách s kónickým zakončením (pro výrobu tkanin)
- rovinové tkaniny
- rohože
 - netkané textilie, rouna – vlákna mají nahodilé uspořádání, jsou kontinuální délky nebo jsou sekaná na větší délku, vlákna leží v rovině
 - sekaná vlákna – mají délku od 25–50 mm, v rohoži jsou spojena polymerními pojivy, které jsou rozpustné v pryskyřicích
 - kontinuální vlákna – v rohoži jsou vzájemně propletena, proto není potřeba je fixovat pojivem
- prepregy – jsou role o různé šířce, které obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu, či rohož, která je impregnovaná nevytvrzenou polymerní matricí
- voštiny
 - pro jádra sendvičových konstrukcí s různou výškou, velikostí a tvarem buněk
 - polymerní voštiny z:
 - krátkých meta-aramidových vláken Nomex
 - para-aramidových vláken Kevlar

[24]

1.5 Vlastnosti vláknových kompozitů

Kompozity jsou velice výhodné, protože jsou v podstatě „šité na míru“ konečné aplikaci a to nejen svoji strukturou a vlastnostmi, ale také výrobní technologií.

Při navrhování různých kombinací materiálů, které mají být použity pro výrobu kompozitů, je však nutné brát na vědomí nejen správný výběr všech materiálů, ale i jejich správný směšovací poměr. Dále je nutné brát na zřetel anizotropní vlastnosti kompozitů. V závislosti na složení a poměru se dále odvíjí vlastnosti jednotlivých kompozitů. [12]

1.5.1 Přehled základních vlastností vláknových kompozitů

- **Vysoká pevnost**

Ve srovnání s konstrukční ocelí je poměr pevnosti k měrné hmotnosti zhruba dvojnásobný. Z tohoto důvodu jsou kompozity používány k vytváření nosných konstrukcí vícepodlažních budov, pochůzkových můstků a dalších konstrukcí, kde je vyžadována náročná pevnostní aplikace. [12]

- **Nízká hmotnost**

Měrná hmotnost vláknových kompozitů je cca 1,5 krát nižší nežli měrná hmotnost hliníku a cca 4,5 krát menší než měrná hmotnost ocele. Tato vlastnost je velice výhodná, protože umožňuje snadnou manipulaci a není zapotřebí zvedací zařízení. Tato vlastnost také umožňuje sestavení dílčích částí konečné konstrukce mimo a poté je dopravit v celku. [12]

- **Odolnost proti korozi**

Kompozity jsou odolné proti atmosférické korozi. Většina kompozitů je také odolná proti korozi, která je způsobena chemikáliemi, vodou, bakteriemi, oleji atd. Z tohoto důvodu není zapotřebí jejich povrch opatřovat ochrannými povlaky či nátěry. [12]

- **Tepelné a požární vlastnosti**

Jelikož kompozity patří mezi reaktoplasty (neboli termosety), zvýšení teploty nezpůsobuje jejich tvárnost. Mezi významné vlastnosti patří nízká tepelná vodivost a rozměrová stálost. [12]

- **Elektrické vlastnosti – nevodivost, elektromagnetická transparentnost**

Elektrická nevodivost se využívá u míst, kde dochází k manipulaci s elektrickým zařízením např. u elektrorozvoden, prostorů pod trolejovým napětím atd. Dále se tato

vlastnost úspěšně používá při výrobě elektrických izolátorů, pochozích ploch, plotů, zábradlí atd.

Elektromagnetická transparentnost kompozitů se používá v blízkosti antenních systémů v podobě kompozitních profilů. [12]

- **Snadné opracování**

Kompozity je možné opracovávat (řezat, brousit, soustružit atd.) běžnými nástroji, které se používají na opracovávání kovů. [12]

- **Snížení nákladů na údržbu**

Jak již bylo napsáno, kompozity jsou odolné vůči korozi a také jsou odolné proti UV záření. Tyto jejich vlastnosti zajišťují, že nevyžadují prakticky žádnou údržbu v jakýkoliv podmínkách. [12]

1.6 Nevýhody kompozitů

Způsob zpracování kompozitů oproti tradičním materiálům je významně odlišný. Výroba kompozitů ve většině případech probíhá v jednom kroku s konečným produktem. Tento fakt může při konstruování nových výrobků způsobovat komplikace.

U tradičních konstrukčních materiálů je snadné oddělit vlastnosti materiálu od užitných vlastností konečného výrobku, u kompozitů je to však velice obtížné. [24]

1.7 Použití kompozitů

Pro své vlastnosti jsou kompozity používány v mnoha oblastech. Např. v.:

- letectví (křídla, přistávací kola a trupy letadel, vrtule helikoptér atd.),
- automobilový průmysl (skříň sedadel, části karosérie, kryty světel atd.),
- lodě (paluby, stožáry, trupy atd.),
- chemický průmysl (tlakové nádoby, nádrže, cisterny atd.),
- elektrotechnika (izolátory, rozvaděče, spínače atd.),
- sport (lyže, kanoe, tenisové rakety, rybářské pruty, plavecké bazény atd.),
- nábytek a zařízení (skříň, stoly atd.),

- stavebnictví (pro zesílení zděných, betonových, ocelových a dřevěných konstrukčních prvků). [24]

1.7.1 Použití kompozitů ve stavebnictví

Pro své vlastnosti se kompozity úspěšně používají v mnoha oblastech stavebnictví. Např. se používají při výrobě nosných prvků konstrukcí. Jsou tedy vhodnými kandidáty na náhradu kovů a jiných materiálů, které se běžně na nosné prvky konstrukcí používají. Dále se kompozity používají na výrobu plošin, žebříků, lávek, schodišť, roštů atd. Jelikož jsou tyto materiály odolné proti korozi, úspěšně se také aplikují v prostorech, kde je zvýšená vlhkost. Dále se aplikují v prostorech, kde je vysoká agresivita prostředí z důvodu jejich odolnosti vůči ÚV záření a povětrnostním vlivům. Splňují požadavky na dlouhodobou životnost a nevyžadují téměř žádnou údržbu.

1.7.2 Použití čediče a čedičových vláken ve stavebnictví

V dřívějších dobách byl čedič pro stavební účely používán převážně v oblastech jeho přirozeného výskytu, tj. v podhůří Lužických hor, na Českolipsku a Děčínsku. Čedič jako stavební materiál nejprve našel uplatnění v podobě štěrku pro výstavbu silnic a také k výrobě dlažebních kostek. Čedič se dále také částečně využíval ve venkovském stavitelství. Zde byl používán jako zdící materiál na stěny, podezdívky, opěrné zídky, či plotové sloupky. V dnešní době se čedič ve stavebnictví používá převážně na výrobu čedičové dlažby. [15]

Z čedičových vláken se vyrábějí perlinkové tkaniny (armovací tkaniny), které se používají pro vyztužování fasádních zateplovacích systémů a na omítkové systémy. Dále se z čedičových vláken vyrábí čedičová vlna, která je vhodná pro nezátížené tepelné, zvukové, ale i protipožární izolace. [1]

Čedičová vlákna se dále používají na výrobu geotextilií. Geotextilie se používají převážně v silničním a železničním stavitelství. Další využití těchto vláken ve stavebnictví je na výrobu tepelně – izolačních směsí pro žáruvzdorné stavební hmoty, plniva do tmelů atd. [1]

Dále se čedičová vlákna používají jako výztužné složky do kompozitů. Novým trendem je použití výrobků z čedičových vláken do vláknobetonů, kde nahrazují ocel nebo

skleněná vlákna. Sklo a ocel nejsou chemicky odolné v alkalickém prostředí, a proto nejsou v betonu stabilní a dochází zde k jejich korozi. Alkalickému prostředí odolává pouze sklo typu AR. Nevýhodou těchto skleněných vláken je jejich vysoká pořizovací cena. Čedičová vlákna jsou v silně alkalickém prostředí chemicky stálá. Z tohoto důvodu vznikla myšlenka použití těchto vláken jako výztuž do betonu. [19, 22]

1.7.3 Použití čedičových vláken jako výztuž do betonu

Podle [22] byla provedena studie, kdy se do betonů přidávala jako výztužný materiál čedičová tkanina. Před vlastním použitím čedičových tkanin do betonu byly provedeny zkoušky u třech typů vláken, a to u vláken čedičových, skleněných a uhlíkových. Vlákná byla nejprve ponořena do alkalického roztoku. Následně byl sledován úbytek hmotnosti a také byla sledována pevnost v tahu. Nejvíce se pevnost a hmotnost snížila u skleněných vláken. Nejlepší pevnost byla zachována u čedičových vláken, nejnižší úbytek hmotnosti nastal u vláken uhlíkových. Tato zkouška byla provedena pro posouzení vhodnosti použití vláken do betonu. Beton má díky cementu alkalické prostředí, prioritní vlastnost betonu je jeho pevnost, proto byla pro experiment použita tkanina z čedičových vláken. Byl zde zkoumán vliv tkaniny na pevnost v ohybu u betonu. Tkanina byla použita v jedné, dvou a třech vrstvách. Nejlepší výsledek byl zjištěn při použití dvou vrstev tkaniny. Naopak při použití třech vrstev nastal výrazný pokles pevnosti.

Dále byl čedič podle [19] do betonu přidáván ve formě prutů a rovingu. Při tomto experimentu byly provedeny zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Při použití těchto výztuží byla u betonu zaznamenána až 3x vyšší pevnost oproti betonu litému.

Jelikož jsou čedičová vlákna mimořádně pevná v tahu a mají vysoké moduly, došlo ke zlepšení vlastností samotného litého betonu. Použití čedičových vláken do betonů jako náhrada za sklo či ocel je také ekonomicky výhodné. Jelikož je čedič koroziodolný, odpadají náklady na údržbu.

2 Rozdělení anorganických vláken

Anorganická vlákna jsou vlákna nepolymerní. Patří do skupiny vysoce pevných vláken. Základní dělení těchto vláken je na přírodní a chemická vlákna. Přírodním anorganickým vláknem je azbest. Mezi anorganická vlákna vyrobená uměle patří vlákna skleněná, horninová a strusková. Anorganická vlákna vyrobená uměle jsou na bázi křemíku.

Tato vlákna jsou dále tříděna do podskupin:

- vlákna s vysokou tepelnou odolností,
- vysoce pevná vlákna,
- vlákna s vysokým modulem.

[18]

2.1 Vlákna s vysokou tepelnou odolností

Tato vlákna odolávají extrémně vysokým teplotám (až 2000 °C). Tepelná odolnost je posuzována nejen podle maximální tepelné expozice, ale také podle celkové doby, kterou teplo na vlákno působí. Do této skupiny patří především vlákna křemíková, uhlíková, keramická atd. [25]

2.2 Vysoce pevná vlákna

Tato vlákna se vyznačují především svojí extrémní pevností, nízkou tažností a vysokým počátečním modulem. Vysoce pevná vlákna se vyznačují poměrně nízkou odolností ve stlačení a ohybu. Většinou jsou tato vlákna nehořlavá a odolávají vysokým teplotám. Oblast použití těchto vláken jsou technické textilie (např. kosmos, letadla, lodě), kompozitní struktury či ochranné oděvy (vesty, rukavice). [21, 25]

2.3 Vlákná s vysokým počátečním modulem

Tato vlákna jsou charakterizována svými vysokými počátečními moduly. Všeobecně platí, že vlákno s vysokým modulem je málo pružné a vysoce pevné. Z hlediska anizotropie modulů tato vlákna rozdělujeme do dvou skupin, a to:

- Vlákná prakticky izotropní, tzn., že u těchto vláken je modul pružnosti ve všech směrech prakticky stejný. Do této skupiny patří keramická a skleněná vlákna.
- Anizotropní vlákna, tzn. že vlákna mají rozdílný modul v různých směrech namáhání. Do této skupiny patří organická, uhlíková a čedičová vlákna. [25]

3 Čedič

Čedič nebo také basalt je přírodní materiál, který se nachází na celém světě, tedy i v České Republice. Je to hornina sopečného původu barvy šedočerné až černé. Zvětralý čedič má barvu šedou. Tato hornina vznikala již ve třetihorách z vyvřelého magma, které chladlo a tuhlo na zemském povrchu. Je to tedy neovulkanická vyvřelina. Magma, které bylo vylito na zemský povrch mělo ke své krystalizaci jiné podmínky než magma, které zůstalo v hlubinách hornin. Charakteristickým znakem čediče je tvorba pětihanných až šestihanných pravidelných sloupců. [21]

Čedičové horniny tají přibližně v rozmezí 1 500–1 700 °C. Pokud se čedič dostatečně rychle ochladí, vzniká sklovitá struktura, která je amorfni. Pomalé chladnutí vede ke vzniku krystalické struktury směsi minerálů. [18]

Aby byly čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken, zpravidla obsahují dva základní minerály. A to olivín ($2(\text{MgFe}) \text{O SiO}_2$) a nefelin ($\text{Na}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 2\text{SiO}_2$). [18]

Protože mají vyvřelé horniny, tedy i čedič, dostatečnou tekutost při určitých teplotách, jsou vhodné pro průmyslové zpracování a jsou vhodné pro výrobu vláken. [25]

3.1 Složení čediče

Čedič se skládá z několika složek. Nejvíce zastoupenou složkou je oxid křemičitý. SiO_2 je zde zastoupen přibližně v rozmezí 43,3–47 %. Dále je zde obsažen oxid hlinitý (Al_2O_3) v rozmezí 11–13 %. Oxid vápenatý (CaO) je zde zastoupen přibližně 10–12 %, podíl oxidu hořečnatého (MgO) je mezi 8–11 %. Ostatní oxidy mají podíl nižší než 5 %.

Podle obsahu oxidu křemičitého se čediče rozdělují do tří skupin, a to:

- bázické, neboli alkalické čediče (s obsahem SiO_2 do 42 %),
 - slabě kyselé čediče (s obsahem SiO_2 v rozmezí od 43 – 46 %),
 - kyselé čediče (s obsahem SiO_2 nad 46 %).
- [18]

Základní hmota čediče je tvořena:

- pyroxeny – augit, titanaugit,

- plagioklasy – labradorit, zbornit,
- olivín.

Pyroxeny tvoří cca 50 % hmotnosti, jsou to metasilikáty, pro které je charakteristická téměř dokonalá štěpnost.

Plagioklasy patří mezi živce. Tvoří asi 30 % hmotnosti.

Olivín je minerál s proměnlivým podílem železa a hořčíku. Tento podíl je závislý na podmínkách při vzniku čediče. Olivín tvoří asi 20 % hmotnosti. [20]

3.2 Čedičová vlákna

Čedičová vlákna patří do skupiny horninových vláken. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve v době nedávné, jedná se v podstatě o nový typ technického vlákna. Vlastnosti čedičových vláken jsou velice podobné vlastnostem skleněných vláken typu S. Pro výrobu skleněných vláken se však převážně používá sklo typu E, které má odlišné složení i vlastnosti než vlákna čedičová. Pro své vlastnosti jsou čedičová vlákna vhodná k výrobě produktů, na které jsou kladeny zvýšené užité vlastnosti, tepelně – izolační vlastnosti, a také zvýšená chemická odolnost. Další výhodou je cena čedičových vláken, která je nižší než cena skleněných vláken. [1, 2]

Čedičová vlákna mají téměř kruhový průřez a jsou téměř hladká. V dnešních dobách se čedičová vlákna vyskytují ve formě kontinuálních a staplových vláken. [21]

3.2.1 Historický vývoj horninových vláken

Sopečná vlákna patří mezi nejstarší horninová vlákna. Některé lávy byly takového složení a viskozity, že se při určitých podmínkách trhaly a vytahovaly ve vlákna, horninovou vlnu. Chemické složení čedičových vláken je velmi podobné jako složení sopečných vláken. [16]

K rozšířenému rozvoji výroby horninových vláken došlo až na počátku 20. stol. V roce 1920 získala francouzská společnost Genérale první patent na výrobu čedičových vláken. Největší rozvoj ve výrobě horninových vláken nastal teprve po druhé světové válce. [16]

V roce 1952 se začala horninová vlákna vyrábět i v Československu v Duchcovských sklárnách. V dalších letech byly uvedeny do provozu další výrobní horninových vláken. Výroba těchto vláken byla v naší zemi rozšířena nejen pro jejich výborné vlastnosti, ale také z důvodu nízké výrobní ceny. K jejich výrobě se používaly domácí suroviny. U většiny vláken stačilo pouze upravit výchozí surovinu a dále nebylo zapotřebí dalších úprav. [16]

3.2.2 Výroba čedičových vláken

Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných. [17]

Základní požadavky na surovinu pro výrobu vláken:

1. Surovina musí být homogenní, stejnorodá. Čedič nesmí obsahovat tělesa jiného složení. Velmi škodlivé jsou také např. úlomky podložních hornin, jako jsou zrna křemene atd. [17]
2. Surovina nesmí být hrubozrnná. Všeobecně totiž platí, že se stoupající velikostí krystalů se prodlužuje doba tavení a také se zhoršuje homogenizace. [17]
3. Pro výrobu vláken by měl být používán čedič, který je nezvětralý. Zvětráním dochází k nežádoucím změnám v chemickém i nerostném složení. [17]

Čedičová vlákna jsou vyráběna ve formě kontinuálních vláken nebo ve formě staplových vláken o délce 1–500 mm.

3.2.2.1 Technologie výroby kontinuálních čedičových vláken

Čedičová vlákna se vyrábějí jednostupňovým tažením vlákna, které probíhá při teplotách 1 500–1 700 °C. Dále se na vlákna nanáší lubrikace. Lubrikace snižuje mechanické poškození vláken při tření vláken o sebe. Při mechanickém poškození se výrazně snižuje pevnost vyráběných vláken. Po nanesení lubrikace probíhá navíjení vyrobených vláken. Pro výrobu čedičových vláken se nejlépe osvědčily středně kyselé čedičové vyvřeliny. [17]

3.2.2.2 Technologie výroby krátkých čedičových vláken

- Pneumatický způsob výroby – vlákna jsou tvarována pomocí dynamických sil, tyto síly jsou přenášeny z proudícího plynu na pramínky taveniny pomocí tření.
- Odstředivý způsob výroby – vlákna jsou tvarována pomocí působení odstředivých sil z vlákniny, která je unášena rotujícím tělesem.
- Kombinovaný způsob výroby – kombinace předešlých způsobů. [3]

3.2.3 Vlastnosti čedičových vláken

Barva čedičových vláken je hnědá, hnědošedá, hnědozelená, zelená. Barva závisí na obsahu jednotlivých oxidů v surovině. Tato vlákna jsou nehořlavá, mají minimální nasákavost. Výhodou je jejich velký tepelný rozsah použitelnosti. Tento rozsah se pohybuje v rozmezí cca od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čedičová vlákna se vyznačují svoji chemickou odolností ve vodě a v alkáliích. Tato vlákna mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký koeficient zvukové pohltivosti a vysoký elektrický odpor. Dále tato vlákna mají dobrou tepelnou odolnost, odolnost proti UV záření a jsou odolná proti plísním a jiným mikroorganismům. Tato vlákna se vyrábějí s minimálním průměrem $9\text{ }\mu\text{m}$. [21]

Čedičová vlákna úspěšně nahrazují vlákna skleněná. Fyzikální, tepelné a chemické vlastnosti čedičových vláken jsou srovnatelné s vlastnostmi skleněných vláken. Porovnání těchto vlastností je znázorněno v tabulce 1, 2 a 3. Pouze skleněné vlákno typu AR odolává stejně jako vlákna čedičová alkalickému prostředí. Oproti čedičovým vláknům je jeho cena několikanásobně vyšší. Další výhodou je nehořlavost čedičových vláken. [1, 24]

Tab. 1 Hodnoty fyzikálních vlastností čedičových a skleněných vláken

Fyzikální vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2 900	2 600
Navlhavost [%]	0,5	1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	100	70
Pevnost v tahu [GPa]	1,85-2,15	1,85-2,15
Pevnost v tlaku [GPa]	0,3	0,3
Změna pevnosti v tahu [%]		
při relativní vlhkosti 100 % za 64 dny	91	72
při teplotě $400\text{ }^{\circ}\text{C}$	82	52

Tab. 2 Hodnoty chemických vlastností čedičových a skleněných vláken

Chemická vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v H ₂ O [%]	99,8	99,3
Úbytek hmotnosti při 100 °C za 3 hod. v 2N HCL [%]	81,8	52

Tab. 3 Hodnoty tepelných vlastností čedičových a skleněných vláken

Tepelná vlastnost a její jednotka	Čedičová vlákna	Skleněná vlákna
Pracovní teplota [°C]	-200 až +700	-60 až +460
Měrná tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,027 až 0,033	0,029 až 0,035

3.2.4 Čedičová vlákna a životní prostředí

Výroba a likvidace čedičových vláken, oproti vláknům obdobným je k životnímu prostředí velice šetrná, což je velkou výhodou. Je zde i menší zdravotní riziko při zpracovávání a používání. Čedičová vlákna jsou přírodním materiálem, který se dále zpracovává bez dalších přísad, a proto jsou tato vlákna snadněji recyklovatelná. Čedičová vlákna nejsou karcinogenní ani fibrogenní. Jelikož se tato vlákna vyrábějí s minimálním průměrem vláken 9 μm , není možné je vdechnout. [25]

4 Beton

Beton patří mezi často používané kompozity. Je to umělý slepenec, do kterého se jako plnivo používá kamenivo, které je většinou přírodní. Funkci pojiva zde ve většině případech zastává cement. [14]

Beton je nejčastěji využíván jako stavební materiál, kterého jsou vyráběna nepřeberná množství v podobě různých modifikací. Vytvářené modifikace vykazují velice odlišné vlastnosti výsledného betonu. Modifikace, a tedy i vlastnosti betonů, jsou závislé na použitém druhu, poměru výztuže a matrice, ale také na zvolené výrobní technologii. [14]

Jako beton je podle normy označována již směs složek po jejich vzájemném smíchání, nikoli pouze pevná, tvrdá hmota. Promíchané složky jsou nazývány „čerstvý“ beton. Základní terminologie se řídí normou ČSN EN 206 – 1 (732403): Beton - Část 1.: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. [10, 14]

4.1 Složky betonu

Základními složkami betonu jsou kamenivo, cement a voda. Kamenivo zaujímá největší podíl objemu betonu, tvoří cca 2/3 celkového objemu. V dnešní době je obvyklé složení kameniva ze tří frakcí, a to z písku (velikost zrn se pohybuje v rozmezí od 0–4 mm), dále z jemného šterku (zrna o velikosti od 4–8 mm) a hrubého šterku (velikost zrn od 8–22 mm). Cement je nejdůležitější složkou betonu. Tato složka zaručuje vytvoření umělého slepence, plní zde funkci pojiva. Další složka potřebná k výrobě betonu je voda. Nejvhodnější voda k výrobě betonu je voda pitná. Tato voda neobsahuje látky, které by ohrozily průběh hydratace. [14]

V současné době se však beton pouze z těchto základních složek již téměř nevyrábí. Moderní rozvoj stavební chemie přinesl do oblasti betonu mnoho nových látek, které mají výrazný vliv na výsledné vlastnosti betonů. Všeobecně je beton složen z přísad a příměsí. [14]

4.1.1 Přísady

Za přísady se považují takové látky, které se do betonu dávají jen ve velice malém množství. Tyto látky však výrazně ovlivňují některé významné vlastnosti betonu. Vzhledem k malému množství těchto látek vyžaduje jejich dávkování vysokou přesnost. Dalším důležitým úkolem je, že tyto látky musí být v celé směsi dokonale rozptýleny. Přísady je nutné volit podle požadovaných vlastností výsledného betonu, je nutné brát v úvahu všechny vlastnosti, které výsledný beton ovlivní. Znamená to tedy, že se musí brát v úvahu, možné ovlivnění vlastností, které ovlivnit nechceme. Mezi přísady patří např. urychlovač tvrdnutí betonu, provzdušňovací, vodotěsnící, protimrazová přísada atd. [14]

4.1.2 Příměsi

Příměsi jsou takové látky, které se do betonu, na rozdíl od přísad, dodávají ve vysokých dávkách. Typickou příměsí je např. cement. Dále se mezi příměsi řadí např. práškovitý materiál, který se do betonu přidává pro zlepšení určitých vlastností. [14]

4.2 Základní požadavky na beton

Mezi základní požadavky na betonovou směs (čerstvý beton) patří především dobrá zpracovatelnost odpovídající prostředku pro hutnění. Hutnění je metoda mechanického zvyšování hustoty materiálu, která slouží k zvyšování únosnosti materiálu, zamezí sesedání, předchází poškození mrazem atd. Zpracovatelnost je v tomto případě chápána jako schopnost betonové směsi vyplnit při uvažovaném způsobu hutnění betonový objem betonem s požadovanou hutností. Zpracovatelnost betonové směsi je ovlivněna vnitřním třením ve směsi. Aby hutnost betonové směsi byla co nejlepší, měl by být obsah vzduchu v této směsi minimální (pokud se nejedná o tzv. provzdušněný beton). Dále je velice důležitá homogenita směsi. Pokud betonová směs není stejnoměrně promíchána, mohou být vlastnosti betonu v různých místech rozdílné. [14]

Na ztvrdlý beton jsou kladeny požadavky, mezi které patří především pevnost, hutnost, ale také cena. Pevnost betonu je většinou zjišťována jako pevnost v tlaku, u některých betonů se také zjišťuje pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. U vláknobetonů se většinou provádějí obě zkoušky pevnosti. Pevnost v tlaku je zjišťována na tělesech,

kteřé mají tvar krychle nebo válce. Pevnost v tahu je zjišťována na tělesech ve tvaru kvádrů. [14]

Podle následného použití betonu může být také důležitá jeho objemová hmotnost. Pomocí objemové hmotnosti se prověřuje, zda byla betonová směs dobře zpracována. [14]

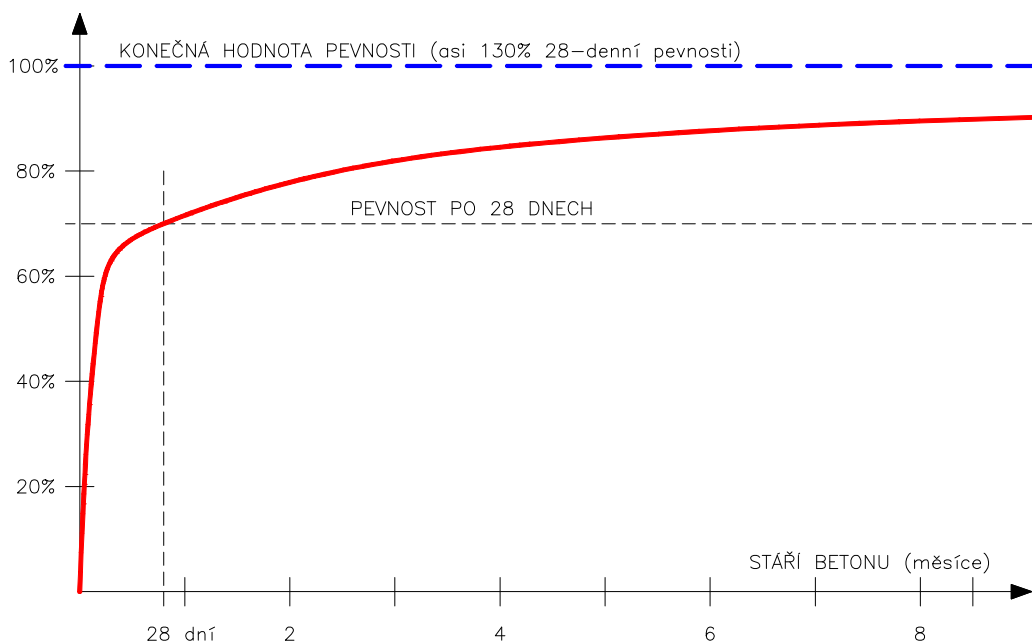
Mezi speciální požadavky na ztvrdlý beton patří např. vodotěsnost, trvanlivost a odolnost betonu vůči agresivnímu prostředí. [14]

Požadavek na ztvrdlý beton v konstrukci je jeho stejnoměrný vzhled. V tomto případě se však nejedná o požadavek estetický. U stejnoměrného betonu platí totiž předpoklad, že fyzikálně-mechanické vlastnosti betonu budou ve všech místech konstrukce přibližně shodné. [14]

4.3 Vlastnosti betonů

Velice důležitou vlastností betonu je, že se jedná o „živý“ materiál. To znamená, že se vlastnosti betonu v čase mění, někdy i velmi zřetelně. Po 28 dnech tvrdnutí od záměsi má beton přibližně 70 % výsledné relativní pevnosti. „Mladý“ beton je označení pro beton, který nedosáhl stáří 28 dnů, „zralý“ beton je beton starý 28 a více dnů. [14]

Závislost pevnosti na stáří betonu je znázorněna na obrázku 3.



Obr. 3 Závislost pevnosti betonu na jeho stáří

Další významnou vlastností betonů je jejich univerzálnost, tzn. že funkce betonů mohou být velice různorodé. [14]

Velkou výhodou je možnost zhotovení betonu prakticky kdekoli a kdykoli, výrobní technologie je relativně jednoduchá. Požadované konstrukce lze navrhnout prakticky v jakémkoliv geometrickém tvaru. Beton je recyklovatelný materiál. [14]

4.4 Základní rozdělení betonů

4.4.1 Rozdělení betonů podle objemové hmotnosti

Objemová hmotnost obyčejného betonu se pohybuje v rozmezí od 2 000–2 600 $kg \cdot m^{-3}$. Tento beton se používá jako beton konstrukční nebo výplňový. [14]

Lehký beton má objemovou hmotnost nižší než 2 000 $kg \cdot m^{-3}$. Nižší objemové hmotnosti se dosáhne použitím většího množství lehkého kameniva nebo je zde velké množství vzduchových pórů. Použití tohoto betonu je např. jako beton izolační. [14]

Těžký beton má objemovou hmotnost vyšší než 2 600 $kg \cdot m^{-3}$. Zvýšení objemové hmotnosti se dosáhne použitím speciálního přírodního kameniva (zejména hornin) s vyšším obsahem železa.

4.4.2 Rozdělení betonů podle vyztužení

Prostý beton (nebo také nevyztužený) má dobrou pevnost v tlaku, avšak pevnost v tahu je cca 1/10 pevnosti v tlaku. Z tohoto důvodu se tento beton používá pouze tam, kde je předpoklad pouze tlakové zátěže. [14]

Vyztužený beton může být vyztužen tzv. *soustředěnou* nebo *rozptýlenou* výztuží. Jako soustředěné výztuže se převážně používají ocelové dráty a tyče, rozptýlená výztuž je tvořena vlákny, které jsou náhodně rozptýleny a orientovány. Toto vyztužení obvykle zlepšuje tahovou i tlakovou pevnost, ale také houževnatost betonu. [14]

4.4.3 Rozdělení betonů podle hutnosti

Ve struktuře hutného betonu zaujímají vzduchové póry cca 5 % celkového objemu. Procentuální zastoupení je vztaženo na čerstvý beton po dokončení hutnění. Velikost a Využití odpadů krátkých čedičových vláken pro kompozitní materiály

umístění pórů je různé a je zde nežádoucí. Přítomnost těchto pórů je způsobena nedokonalým zpracováním betonové směsi. Póry negativně ovlivňují vlastnosti betonu. [14]

Objem pórů v provzdušněném betonu se pohybuje mezi 5–10 %. Zde jsou póry umístěny cíleně za účelem zlepšení některých vlastností např. zpracovatelnosti směsi, mrazuvzdornosti betonu atd. Velikost těchto pórů je nižší než velikost pórů nežádoucích. Rozmístění těchto pórů v betonu je stejnoměrnější než u betonu předcházejícího. [14]

Beton, kde vzduchové póry přesahují 10 % celkového objemu se nazývá beton pórový. Vzniklé póry mají u těchto betonů výrazný vliv na snížení hmotnosti, ale také na snížení pevnosti. [14]

Speciální výplňový beton je beton mezerovitý. V tomto betonu se již neobjevují oddělené vzduchové póry, ale mezery, které jsou navzájem propojené. U těchto betonů je zastoupen dominantní podíl hrubé frakce kameniva. Zrna kameniva jsou obalena filmem cementové malty, při hutnění dojde k jejich spojení. Velká část mezer mezi zrny kameniva však zůstane nezaplněna. [14]

4.4.4 Rozdělení betonů podle pevnosti

Podle pevnosti se beton zařazuje do tříd jakosti. Třídy betonu určují mimo jiné i výši napětí v konstrukci. Označení tříd jakosti je různé.

Podle normy [12] se třída pevnosti betonu označuje např. C 20/25, kde „C“ je označení betonu (Concrete), první číselné označení je hodnota minimální válcové pevnosti v tlaku. Válec má výšku 300 mm a základnu o průměru 150 mm. Druhé číslo je minimální hodnota krychelné pevnosti v tlaku. Krychle má strany dlouhé 150 mm.

Označení pro betony, které mají strukturu vyztuženou vlákny, je označení třídy jakosti např. F 20/3,2. Písmeno „F“ označuje vláknobeton (Fibreconcrete), první číselný údaj za písmenem „F“ je hodnota pevnosti v tlaku, druhý číselný údaj je hodnota pevnosti v tahu. [14]

4.5 Zkoušení vlastností ztvrdlého betonu

Základní zkoušenou vlastností ztvrdlého betonu je jeho pevnost. Pro stanovení pevnosti se používají zkoušky destruktivní a nedestruktivní. Destruktivní zkoušky se provádějí na zkušebním tělese, nikoliv na betonu v konstrukci. Tělesa jsou ve zkušebních lisech vystavována rostoucí síle, maximální síla je zaznamenána. Destruktivní metoda je přímá metoda zkoušení pevnosti betonů. U nedestruktivních zkoušek se nejprve stanovuje hodnota jistého znaku betonu. Poté se pomocí tzv. kalibračního vzorce odvozuje z hodnoty znaku pevnost betonu. Jedná se o tzv. zkoušku nepřímou. [14]

4.5.1 Základní destruktivní zkoušky

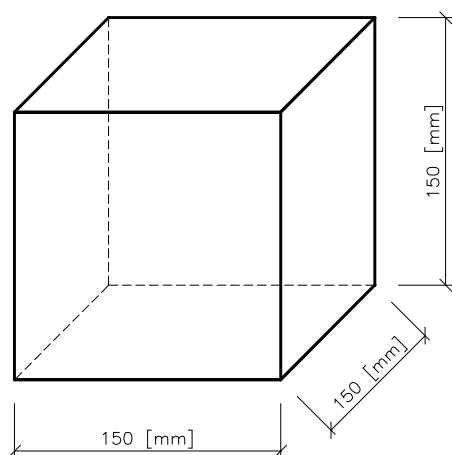
Mezi základní destruktivní zkoušky patří zkoušky pevností v tlaku a v tahu ohybem zkušebních těles. Zkouška pevnosti v tlaku je dána normou [7], zkouška pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles je dána normou [8].

Dle normy [7] je zkouška prováděna na třech možných tvarech těles, jejichž rozměry jsou dány touto normou. Zkušební tělesa mohou mít tvar krychle, válce nebo vývrtu.

Zkoušku pevnosti v tahu ohybem je podle normy [8] možné provádět dvěma způsoby a to zatěžování zkušebního tělesa jedním břemenem uprostřed nebo dvěma břemeny, které jsou od sebe umístěny ve vzdálenosti 1/3 délky vzdálenosti podpěrných válečků. V tomto případě musí být zkušební tělesa vždy hranoly.

4.5.4.1 Zkouška pro stanovení tlakové pevnosti betonu – krychelná pevnost

Jak již bylo napsáno, tato zkouška je dána normou [7]. Norma udává délku hrany krychle 150 mm. Rozměry krychle jsou znázorněny na obrázku 4.



Obr. 4 Rozměry zkušební tělesa pro zkoušku pevnosti v tlaku

Zkouška se provádí na betonových krychlích jejichž stáří je minimálně 28 dnů. Provádí se na zkušebním lisu. Vzorky se do tohoto lisu vkládají tak, aby síla působila kolmo na směr hutnění betonu. Krychle se umísťuje přesně na střed spodní tlačené desky. Po umístění vzorků do zkušební lisu následuje zatěžování. Zatěžování zkušební vzorku spočívá v nastavení konstantní rychlosti zatěžování. Minimální rychlost zatěžování se pohybuje od $0,2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. Zatěžování je nutné provádět plynule, bez nárazu. Na konci zatěžování, tzn. při porušení zkušební krychle se zaznamenává maximální dosažené zatížení. Vyhovující a nevyhovující způsoby porušení krychlí jsou znázorněny v normě [7]. Posledním krokem je přepočet získaných hodnot na pevnost v tlaku, která je dána vztahem (1).

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (1)$$

kde: f_c - pevnost v tlaku [MPa]

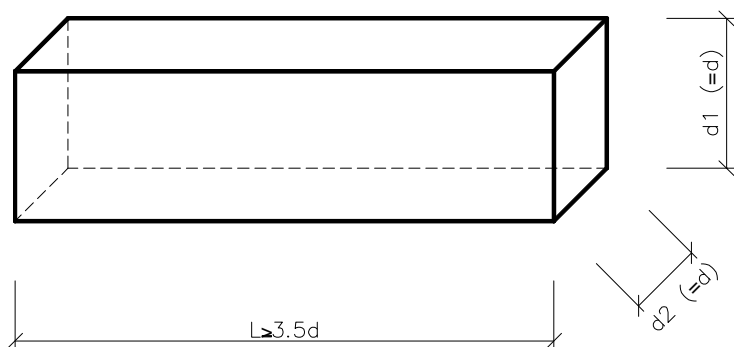
F - maximální zatížení při porušení [N]

A_c - plocha zkušební tělesa [mm^2] [7]

Výsledná pevnost v tlaku se podle normy [7] zaokrouhlí na nejbližších $0,1 \text{ MPa}$.

4.5.4.2 Zkouška pro stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles – zatěžování jedním břemenem uprostřed

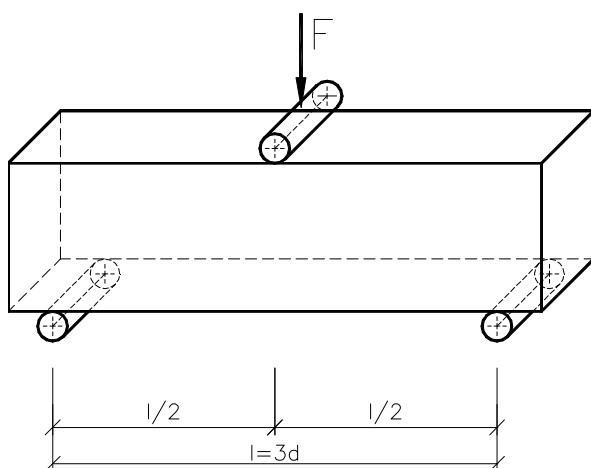
Tato zkouška je dána normou [8]. Zkušební tělesa mají tvar hranolu. Poměry délek všech stran hranolu jsou znázorněny na obrázku 5.



Obr. 5 Poměry délek stran zkušebního hranolu pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

Zkoušku je možné provádět na hranolech, které jsou staré minimálně 28 dnů. K provedení zkoušky je potřeba zkušební lis, jeden zatěžovací váleček a dva podpěrné válečky. Délka válečků je shodná s délkou strany hranolu. [8]

Umístění válečků je znázorněno na obrázku 6.



Obr. 6 Rozmístění válečků při zatěžování zkušebního tělesa pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

Umístění zkušebního tělesa musí být stejně jako u předcházející zkoušky provedeno tak, aby síla působila kolmo na směr hutnění betonu a také aby síla působila v polovině zkušebního tělesa. Po uložení těles a válečků na určená místa, následuje zatěžování. Při zatěžování musí ležet všechny válečky rovnoměrně na zkušebním tělese. Poté je možné nastavit konstantní zatěžovací rychlost, která se pohybuje v rozmezí od $0,04 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ do $0,06 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. Zatěžování musí probíhat plynule, bez nárazu. Stanovenou konstantní rychlostí se zatěhuje do porušení zkušebního tělesa. V okamžiku porušení je nutné

zaznamenat maximální sílu. Poté následuje výpočet pevnosti v tahu ohybem, výpočet je dán vztahem (2).

$$f_{cf} = \frac{3Fl}{2d_1 d_2^2} \quad (2)$$

kde: f_{cf} - pevnost v tahu ohybem [MPa]

F - maximální zatížení [N]

l - vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 - rozměry příčného řezu tělesa [mm] [8]

Výsledná pevnost v tahu se podle normy [8] zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa .

5 Sait-Gobain Isover Častolovice CZ s.r.o.

Dříve Sait-Gobain Orsil s.r.o. Změna názvu je platná od 21.12.2009.

Značka Isover dříve zahrnovala pouze výrobky ze skleněné vlny, dnes jsou pod touto značkou zahrnuty všechny výrobky z minerálních vln, tedy i z vlny čedičové, která byla dříve na trh dodávána pod značkou Orsil. Od 1.1.2010 proběhlo rozšíření této značky o výrobky z expandovaného polystyrenu. [13]

Na obr. 7 je znázorněno logo společnosti.



Obr. 7 Logo Sait-Gobain Isover Častolovice CZ s.r.o.

5.1 Historie společnosti

Sait-Gobain Isover CZ s.r.o. působí na českém trhu již od roku 1939, sídlo této firmy se nachází v Častolovicích. Společnost se od svého založení zabývala výrobou izolačních materiálů z čedičových i skleněných vláken. Produkty této společnosti zastávají funkci tepelné, akustické a protipožární izolace do střech, fasád, stropů, podlah, příček atd. Jsou dodávány na tuzemský i zahraniční trh.

Od 1.1.1996 je společnost Sait-Gobain Isover CZ s.r.o. součástí francouzského koncernu Sait-Gobain se specializací na stavební izolační materiály. [13]

5.2 Výroba čedičové izolace

Mezi vstupní suroviny k výrobě čedičové izolace patří čedič, diabas, struska a brikety. Brikety vznikají recyklací výrobních surovin vznikajících jako vedlejší produkt při výrobě. Recyklace a výroba briket probíhá v Častolovicích.

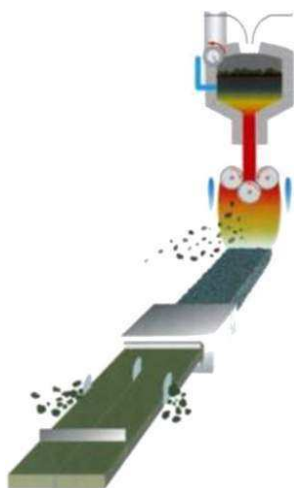
Prvním krokem při výrobě vláken je tavení vstupního materiálu v kupolové peci na roztavenou lávu. Roztavená láva dále natéká na rozvlákňovací stroje. V procesu rozvlákňování vzniká jemné vlákno. Vláknem je vyrobeno odstředivým způsobem. Detail výroby vláken je znázorněn na obrázku 8.



Obr. 8 Detail výroby čedičových vláken odstředivým způsobem

Vlákna se v tenkých vrstvách usazují na pás sběrné komory. Vzniklá vlna se pomocí kyvného systému dále vrství. Počet vrstev koresponduje s vlastnostmi, které má mít finální výrobek. Po navrstvení materiálu dochází v kreovacím zařízení k jeho stlačení na požadovanou tloušťku, popř. zde dochází k dorovnání objemové hmotnosti výrobku. Ve tvrdiví komoře dochází k vytvrzení materiálu. Vytvrzování probíhá pomocí vysoké teploty, která roztaví nanášenou pryskyřici na vláknech a po následném ochlazení výrobku dojde k jeho vytvrzení. Vzniklý výrobek dále putuje k soustavě podélných, příčných a dělicích pil. Zde je výrobek formátován do finálních rozměrů ve tvaru desek či lamel. Výrobky jsou dále baleny do fólie a uloženy do skladu, kde jsou připraveny k expedici.

Celý proces výroby čedičové izolace je znázorněn na obrázku 9.



Obr. 9 Výrobní linka k výrobě čedičové izolace

5.3 Recyklace odpadového materiálu

Vzniklý odpadový materiál je zpracováván v procesu recyklace, který probíhá přímo v Častolovicích. Odpadový materiál se nejprve drtí na recyklační lince.

Rozdrcený odpad je znázorněn na obrázku 10.



Obr. 10 Rozdrcený odpad

Rozdrcený odpad je dále míchán společně s cementovou maltou a je lisován do briket. Vyrobené brikety jsou součástí vstupních surovin při výrobě vláken, izolace.

Na obrázku 11 jsou znázorněny brikety vzniklé slisováním odpadu a cementové malty.



Obr. 11 Brikety vyrobené slisováním rozdrceného odpadu a cementové malty

Pro proces recyklace je používán odpad, který vzniká přímo při výrobě. Dále se recyklují nevyhovující finální výrobky.

Tzv. „suchý odpad“ tímto procesem je nerecyklovatelný, proto se část využívá na tzv. „foukanou“ izolaci, zbylá část se skládkuje.

6 Experimentální část

6.1 Návrh celého experimentu

Jak již bylo zmíněno, některá technická a syntetická vlákna jsou úspěšně přidávána jako výztuž do betonů. Jak uvádí [19, 22] byla čedičová vlákna jako výztuž do betonů použita pouze ve formě tkanin, rovingů, prutů, ne však ve formě krátkých vláken. Z tohoto důvodu je experiment zaměřen na využití odpadů čedičové vlny v betonu.

Experiment byl prováděn na dvou druhích betonu. Potěrovém betonu, ve kterém je kamenivo zastoupeno jemným pískem a běžném betonu s frakcí kameniva 0/4 a 4/8. Z potěrového betonu a odpadů čedičové vlny bylo vyrobeno pět záměsí. První záměs byla tvořena pouze z potěrového betonu. Tato záměs byla použita jako referenční, srovnávací. Do dalších čtyřech záměsí byl přidáván odpad čedičové vlny v různém množství. U těchto vzorků byly odzkoušeny krychelné pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. S ohledem na výsledky získané zkoušením záměsí potěrového betonu byly navrženy záměsi běžného betonu. U těchto záměsí byly provedeny tři zkoušky čerstvého betonu, a to měření konzistence, objemové hmotnosti a obsahu vzduchu. Dále byly provedeny destruktivní zkoušky ztvrdlého betonu, a to zkoumání krychelné pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles a dále byl měřen součinitel tepelné vodivosti.

6.2 Záměsi potěrového betonu a odpadové čedičové vlny

6.2.1 Potěrový beton firmy Weber

Pro první experiment, jehož výsledky sloužily k určení poměrů u dalších záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou, byl použit potěrový beton firmy Weber. Technické údaje tohoto betonu jsou uvedeny na obalu výrobku nebo jsou dostupné z [26].

Potěrový beton je definován jako jednosložková cementová hmota, která se vyrábí pouze v přírodní šedé barvě. Hmota tohoto betonu je na bázi anorganického plniva, pojiva a modifikujících přísad. [26]

Betonový potěr byl zakoupen v pytlích o hmotnosti 25 kg. Objem tohoto pytle činí cca 15 l. V tab. 4. jsou uvedeny technické údaje potěrového betonu, které udává výrobce.

Tab. 4 Technické údaje jemného potěrového betonu Weber

Jemný potěrový beton Weber 25 MPa	
pevnost v tlaku	25 MPa
pevnost v tahu za ohybu	4 MPa
doba zpracovatelnosti	90 min
dávkování vody na 25kg	4,1 l
aplikační tloušťka vrstvy	5-20 mm
objemová hmotnost	1 950 kg*m ⁻³

6.2.2 Návrh experimentu s potěrovým betonem firmy Weber

Pro první experiment bylo navrženo pět záměsů. První záměs byla vyrobena pouze z potěrového betonu a vody. Jelikož výrobce použitého potěrového betonu uvádí pevnosti do maximální tloušťky 20 mm, ale zkoumaná tělesa mají rozměry větší, byla tato záměs použita jako referenční, porovnávací pro záměsi ostatní.

Do dalších vyrobených záměsů byl přidáván odpad ve zvyšujících se objemových poměrech v sypaném stavu bez stlačení. Objemové poměry byly zvoleny z důvodu nízké objemové hmotnosti odpadu čedičové vlny oproti objemové hmotnosti betonu. Všechny zvolené objemy odpadu byly následně převáženy, aby toto dávkování bylo co nejpřesnější. Při zvyšujícím se množství odpadové čedičové vlny byla přidávána voda tak, aby konzistence betonu byla vždy přibližně stejná. Tímto způsobem však došlo ke změnám vodního součinitele u každé záměsi, což je nepříznivé z důvodu snižující se pevnosti při zvyšování dávky vody.

Záměsi byly míchány tak, že se vždy do stejného množství betonové směsi přidávalo různé množství odpadové čedičové vlny. Tento postup byl zvolen, aby bylo dodrženo doporučené dávkování vody od výrobce, tedy 4,1 l na 25 kg potěrové směsi. K tomuto doporučenému dávkování byla při různých poměrech u vyrobených záměsů přidávána voda pro zachování konzistence. Na každý přidáný odpad o objemu 1 l bylo přidáno 0,05 l vody. Hmotnost 1 l odpadu byla cca 0,05 kg.

Zkoušky byly dle normy [10] prováděny na jednom souboru betonů. Jeden soubor je tvořen třemi zkušebními tělesy.

6.2.3 Poměry záměsí potěrového betonu a odpadu čedičové vlny

- 1. záměs – byla vyrobena pouze smícháním potěrového betonu o hmotnosti 25 kg s doporučeným množstvím vody, tedy 4,1 l. Tato záměs byla vyrobena jako porovnávací, z tohoto důvodu zde nebyl přidán žádný odpad čedičové vlny.
- 2. záměs – záměs, která byla tvořena potěrovým betonem a doporučeným množstvím vody, byla navýšena přimícháním odpadu o objemu **20 %** objemu betonu. Tj. do 25 kg ($25 \cdot 10^3$ g) směsi potěrového betonu, která má objem 15 l, byl přimíchán odpad o objemu 3 l. Tento objem odpovídal hmotnosti 0,15 kg (150 g). Množství vody bylo navýšeno o 0,15 l. Celkové množství vody v této záměsi bylo 4,25 l.
- 3. záměs – do záměsi betonu a vody bylo přimícháno **40 %** objemu odpadu z celkového objemu betonu. Výsledná směs byla tvořena 25 kg ($25 \cdot 10^3$ g) směsi potěrového betonu, do které byl přidán odpad o objemu 6 l. Přidaný odpad měl hmotnost 0,3 kg (300 g). Množství vody bylo navýšeno o 0,3 l. Výsledné množství vody bylo 4,4 l.
- 4. záměs – zde byla záměs betonu navýšena o **60 %** objemu odpadu čedičové vlny z celkového objemu směsi betonu. Do směsi betonu o hmotnosti 25 kg ($25 \cdot 10^3$ g) byl přidán odpad o objemu 9 l a o hmotnosti 0,45 kg (450 g). Celkové množství vody bylo 4,55 l z důvodu navýšení o 0,45 l.
- 5. záměs – poslední směs betonu o hmotnosti 25 kg ($25 \cdot 10^3$ g) byla navýšena o stejný objem odpadu jako je celkový objem betonu. Do záměsi bylo přidáno **100 %** objemu odpadu celkového objemu betonu. Odpad měl tedy objem 15 l a hmotnost 0,75 kg (750 g). Množství vody bylo navýšeno o 0,75 l, celkové množství přidané vody bylo 4,85 l. Tento poměr byl stanoven za konečný z důvodu přidávání velkého množství vody, které je nepříznivé pro výslednou pevnost v tlaku i tahu.

6.2.4 Míchání záměsí

Všechny záměsi potěrového betonu a odpadu čedičové vlny byly míchány v dostatečně velké nádobě, aby došlo k dobrému promíchání všech složek. Na míchání záměsí bylo použito profesionální míchadlo Einbenstock EHR. Toto míchadlo je znázorněno na obrázku číslo 12.



Obr. 12 Míchadlo Einbenstock EHR použité k míchání záměsí potěrového betonu a odpadu

Nejprve byla namíchána záměs potěrového betonu a vody. Podle návodu od výrobce byl smíchán pytel směsi vážící 25 kg s 4,1 l vody, vše bylo dokonale promícháno míchadlem.

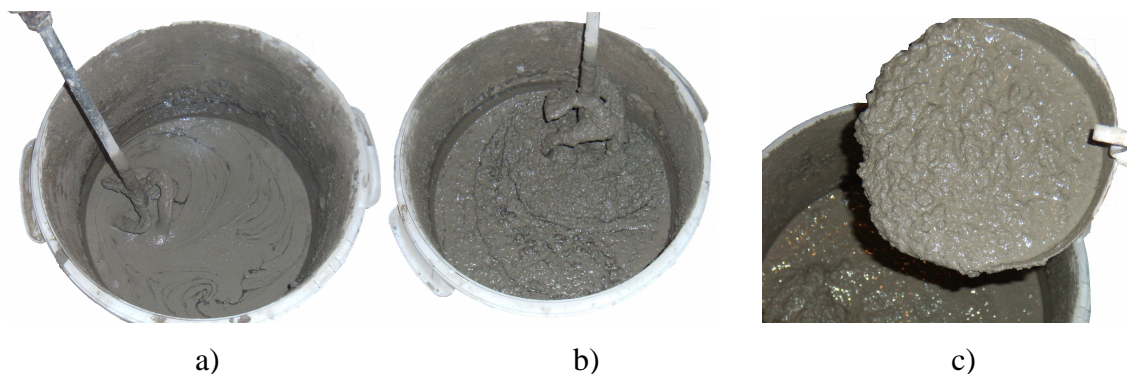
Do dalších záměsí byl postupně přimícháván i odpad čedičové vlny ve výše uvedených poměrech. Na obr. 13 je ukázka vmíchání odpadu do potěrového betonu.



Obr. 13 Ukázka míchání odpadu čedičové vlny s potěrovým betonem

Pro snadnější promíchání betonové směsi s vodou a odpadem, byl zvolen následující postup. Nejprve byla smíchána všechna odměřená voda s cca polovinou pytle potěrové směsi, následovalo dokonalé promíchání. Poté byl do nádoby přidán a dokonale zamíchán navážený odpad čedičové vlny. Po dokonalém promíchání celkového množství vody, odpadu a poloviční dávky betonu byla přisypána zbývající směs potěrového betonu. Opět následovalo dokonalé promíchání vzniklé záměsi.

Při míchání poslední tedy 5. záměsí, kde bylo do betonu přidáno největší množství odpadu, docházelo k tvorbě nežádoucích „hrudek“ i při přidání zvýšeného množství vody. Tyto hrudky se objevovaly na povrchu i po zatvrdnutí betonu. Na obr. 14 je pro lepší porovnání znázorněna 1. záměs čerstvého betonu, tedy potěrového betonu bez odpadu a 5. záměs s nejvyšším množstvím přidávaného odpadu.

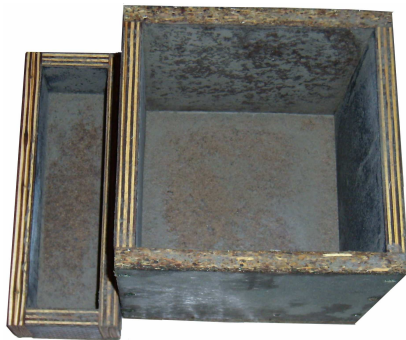


Obr. 14 Porovnání hrudkovitosti a) potěrového betonu bez odpadu a b), c) záměsí s nejvyšším množstvím odpadu čedičové vlny

Po důkladném promíchání záměsí byla vzniklá betonová směs umístěna do forem. Hutnění těchto záměsí bylo prováděno metodou šťouchání.

6.2.5 Formy

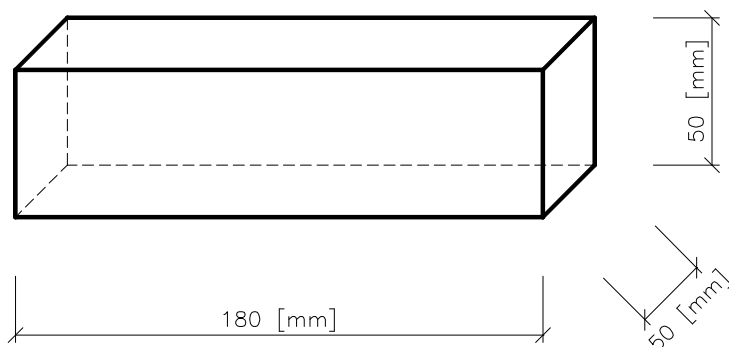
Pro tento experiment byly použity formy vyrobené z vodotěsné překližky. Pro snadnější vyndávání vyrobených zkušebních těles z forem byly formy spojeny pomocí vrutů. Dřevěné formy na výrobu zkušebních těles pro zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles jsou znázorněny na obrázku číslo 15.



Obr. 15 Dřevěné formy použité při výrobě záměsí odpadu s potěrovým betonem pro zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles pro stanovení krychelné pevnosti v tlaku jsou dány normou [7]. Vnitřní rozměry forem byly podle této normy 150*150*150 mm.

Norma [8], jak již bylo dříve napsáno, neuvádí přesné rozměry zkušebních těles, ale pouze jejich poměry. Pro výrobu těles záměsí z potěrového betonu byly vyrobeny formy o vnitřních rozměrech 50*50*180 mm. Rozměry těchto zkušebních těles jsou znázorněny na obrázku číslo 16.



Obr. 16 Rozměry těles pro zkoušku pevností v tahu ohybem zkušebních těles záměsí potěrového betonu a odpadové čedičové vlny

6.2.6 Odbedňování (odformování)

Podle normy [10] byla vyrobena tělesa vyndána z dřevěných forem po 16 hodinách od jejich výroby. Nejdéle by však tato tělesa měla být vyndána po 3 dnech od jejich výroby.

6.2.7 Zrání vyrobených těles

Podmínky pro zrání betonu uvádí norma [10]. Podle této normy je možné provádět zkoušky pevností betonu po 28 dnech od výroby záměsí. Norma uvádí uložení těles po dobu zrání při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 100 %.

Odformovaná tělesa byla uložena v klimatizované komoře akreditované zkušební laboratoře Qualiform v Hradci Králové, kde byly následně provedeny všechny zkoušky na kalibrovaných přístrojích.

6.2.8 Zkoušky ztvrdlého betonu prováděné na záměsech potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou

U těchto záměsů byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoumání krychelné pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Všechny zkoušky byly provedeny na jednom souboru betonů. Soubor betonů je podle normy [10] tvořen třemi zkušebními tělesy.

Tělesa určená k zjišťování pevnosti v tlaku, byla před vlastní zkouškou zvážena. Tyto zjištěné hodnoty dále sloužily k výpočtu objemové hmotnosti ztvrdlého betonu u všech vyrobených záměsů. Dále došlo k přeměření těchto krychlí, zjištěné rozměry sloužily k výpočtu výsledné pevnosti v tlaku.

6.2.8.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu záměsů potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Objemová hmotnost byla vypočtena z hmotností zkušebních těles, které byly určeny pro zkoušku pevnosti v tlaku. Tělesa byla zvážena po 28 dnech zrání od jejich výroby. Hmotnost všech souborů záměsů byla zvážena na analytických vahách od firmy Mettler Toledo v akreditované zkušební laboratoři Qualiform v Hradci Králové. Váha byla zaznamenána s přesností na tři desetinná místa.

Na obrázku číslo 17 jsou znázorněny použité analytické váhy firmy Mettler Toledo.

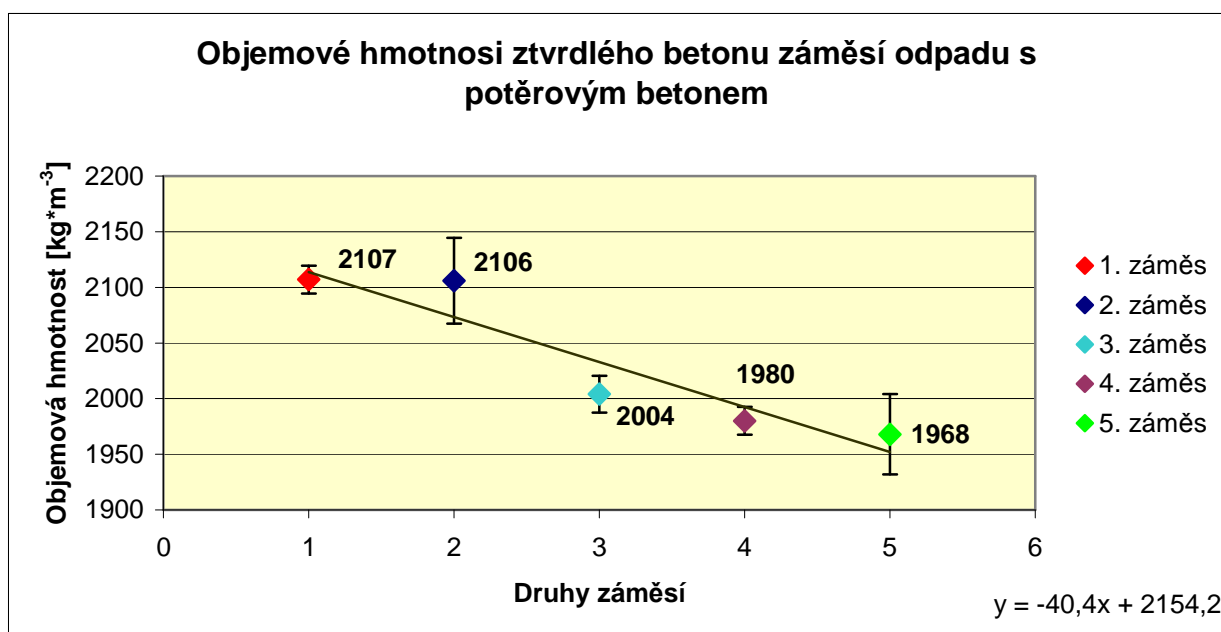


Obr. 17 Analytické váhy Mettler Toledo

Zjištěná data byla statisticky zpracována, byla zprůměrnována, dále byla vypočtena směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Naměřené hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 1. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu č. 1, data byla proložena polygonem 1. stupně. Do grafu byla také vynesena rovnice regrese vzniklé přímky.

Legenda ke grafu:

1. záměs = potěrový beton bez odpadu
2. záměs = potěrový beton s přidáním 20 % objemu odpadu
3. záměs = potěrový beton s přidáním 40 % objemu odpadu
4. záměs = potěrový beton s přidáním 60 % objemu odpadu
5. záměs = potěrový beton s přidáním 100 % objemu odpadu



Graf 1 Průměrné objemové hmotnosti záměsí odpadu s potěrovým betonem Weber

Vyhodnocení experimentu objemových hmotností záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou:

Z grafu č.1 je patrné, že se objemové hmotnosti s přibývajícím odpadem v záměsech snižovaly. Nejvyšší objemová hmotnost byla zaznamenána u 1. záměsi, tedy u záměsi, kde nebyl přidán žádný odpad čedičové vlny. Objemová hmotnost této záměsi byla $2107 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Hmotnost 2. záměsi se oproti záměsi referenční snížila pouze o $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost této záměsi byla $2106 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. U dalších záměsí nastal výraznější pokles objemových hmotností. Objemová hmotnost 3. záměsi činila $2004 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, hmotnost oproti 1. záměsi se snížila o $103 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Naopak hmotnost 4. záměsi se snížila o $127 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost této záměsi činila $1980 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Nejnižší objemová

hmotnost byla zjištěna u 5. záměsi, kde bylo přidáno nejvyšší množství odpadu, a to $1\,968\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hmotnost oproti referenční záměsi se snížila o $139\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

6.2.8.2 Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku

Tato zkouška probíhala v souladu s normou [7]. Zkoušky záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou byly provedeny ve dvou etapách. První zkouška byla provedena po 28 dnech zrání dle doporučení normy [10]. Druhá zkouška byla provedena po 44 dnech zrání betonu z důvodu opravy na součástce potřebné pro měření pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu ohybem zkušebních těles by měly být prováděny na stejně starých zkušebních tělesech. Norma [10] však doporučuje provedení zkoušky po 28 dnech od výroby záměsí. Z tohoto důvodu byly provedeny 2 zkoušky krychelných pevností záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou.

Zkušební přístroj použitý při zkoumání krychelné pevnosti v tlaku:

Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku bylo prováděno v akreditované zkušební laboratoři Qualiform se sídlem v Hradci Králové. Zkouška byla vykonána na kalibrovaném zkušebním lisu BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria. Přístroj je znázorněn na obrázku číslo 18.

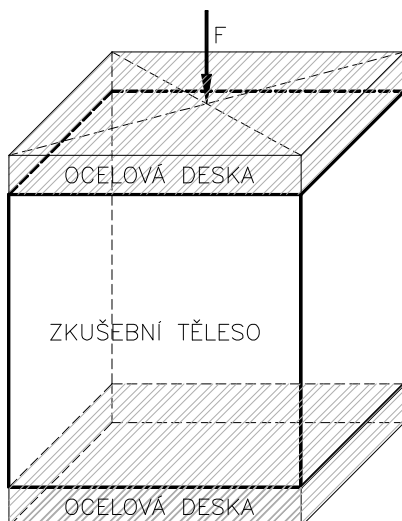


Obr. 18 Zkušební lis pro zjišťování krychelné pevnosti v tlaku od firmy BUEHL+FAUBEL

- 1 – část přístroje určená pro měření pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles
- 2 – část přístroje určená pro měření pevnosti v tlaku
- 3 – zaznamenávání maximální dosažené síly

Zkouška krychelné pevnosti v tlaku byla prováděna v části přístroje, která je na obrázku vyznačená pod číslem 2. Zkušební tělesa zde byla vkládána na přesně vyznačená místa tak, aby síla působila kolmo na směr hutnění. Rychlost zatěžování byla $0,2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$. Zkouška byla prováděna v souladu s normou [7].

Na obrázku číslo 19 je znázorněno působení síly na těleso vložené mezi desky zkušebního lisu.



Obr. 19 Znázornění umístění tělesa mezi ocelové desky zkušebního lisu a působení síly

Postup zkoušky:

Před vlastní zkouškou byla zkušební tělesa nejprve zvážena. Po zvážení následovalo přeměření všech stran krychlí. Na zkušebních tělesech byla měřena a zaznamenána výška, šířka a délka. Rozměry byly zjišťovány ve stejné poloze jako při výrobě tělesa. Tlačná plocha byla výška*šířka. Tato plocha byla následně použita k přepočtu maximální pevnosti v tlaku. Měření bylo provedeno pomocí posuvného měřidla s přesností na celý milimetr.

Po zvážení a přeměření následovalo vlastní drcení vzorků. Po vložení zkušebního tělesa na přesně vyznačená místa se uvedl přístroj do chodu. Na obrazovce počítače byla

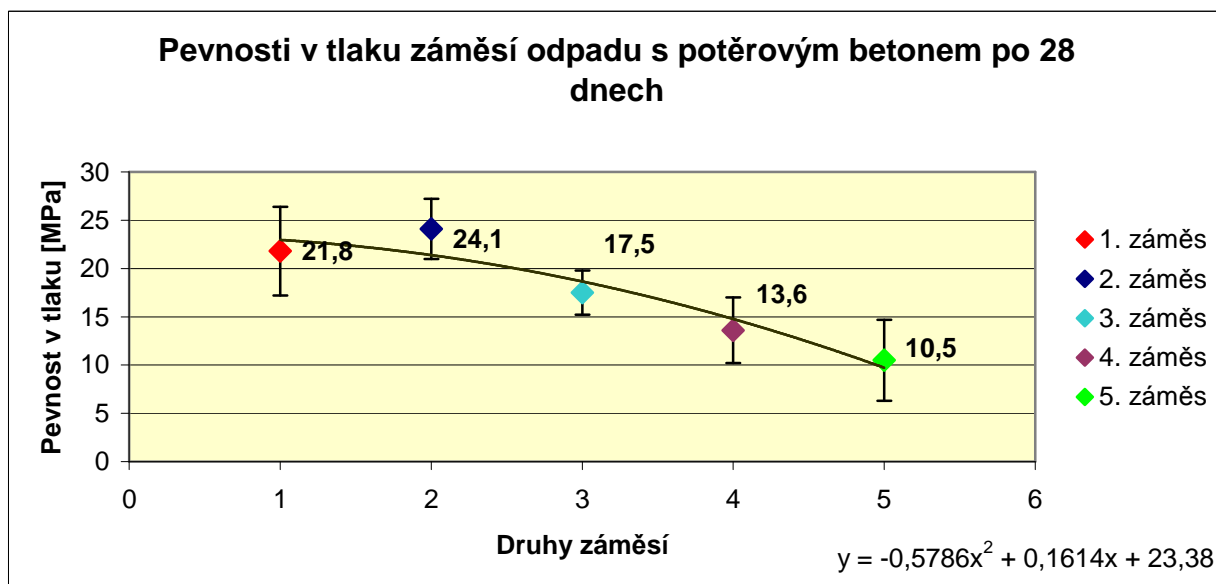
následně zaznamenána maximální dosažená síla [kN], která byla zapotřebí k porušení tělesa. Pevnosti v tlaku byly následně přepočteny pomocí vztahu (1). Podle normy [7] byly výsledky zaokrouhleny na nejbližších 0,1 MPa.

Hodnoty pevností v tlaku byly zprůměrnovány, byla vypočtena směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 2. a 3. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafů č. 2 a 3. Data byla proložena polygonem 2. stupně, dále v grafech byla zaznamenána rovnice regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = potěrový beton bez odpadu
2. záměs = potěrový beton s přidáním 20 % objemu odpadu
3. záměs = potěrový beton s přidáním 40 % objemu odpadu
4. záměs = potěrový beton s přidáním 60 % objemu odpadu
5. záměs = potěrový beton s přidáním 100 % objemu odpadu

Zkouška provedená po 28 dnech

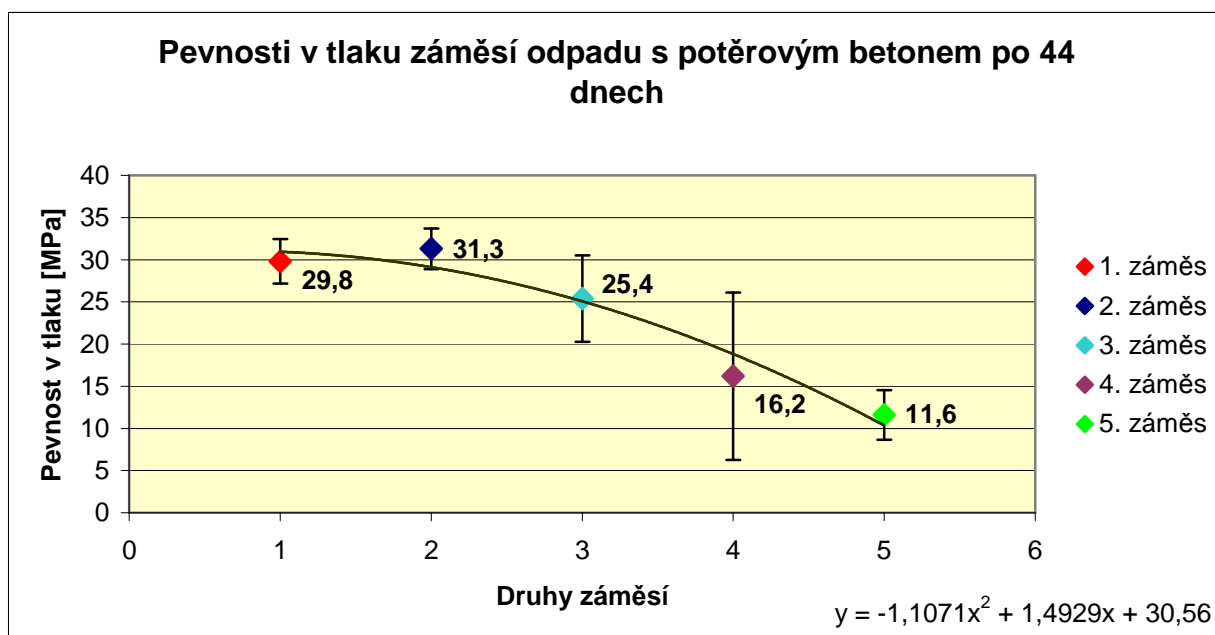


Graf 2 Průměrné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadem po 28 dnech od záměsí

Vyhodnocení experimentu pevností v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech zrání:

Nejvyšší pevnost v tlaku byla v tomto experimentu zaznamenána u 2. záměsi. Tato záměs byla tvořena betonovým potěrem, vodou a byla navýšena o odpad čedičové vlny viz legenda grafu č. 2. Je to tedy záměs s nejnižším množstvím přidaného odpadu. Průměrná pevnost v tlaku této záměsi byla 24,1 MPa. U této směsi došlo k navýšení pevnosti o 2,3 MPa oproti záměsi referenční, kde byla zjištěna hodnota pevnosti v tlaku 21,8 MPa. U zbývajících záměsí byly zaznamenány výrazné poklesy pevností z důvodu vyššího množství přidané vody, které snižuje výslednou pevnost ztvrdlé betonové směsi a pravděpodobně i z důvodu přidání vyššího množství přidané odpadové čedičové vlny. U 3. záměsi byla zjištěna hodnota 17,5 MPa. Došlo tedy ke snížení o 4,3 MPa oproti záměsi tvořené pouze potěrovým betonem a vodou. Pokles pevnosti 4. záměsi byl o 8,2 MPa, pevnost této záměsi byla 13,6 MPa. O 11,3 MPa, tedy více jak o polovinu, klesla pevnost u poslední 5. záměsi. Zde byla pevnost v tlaku 10,5 MPa.

Zkouška provedená po 44 dnech



Graf 3 Průměrné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadem po 44 dnech od výroby

Legenda ke grafu:

1. záměs = potěrový beton bez odpadu
2. záměs = potěrový beton s přidáním 20 % objemu odpadu
3. záměs = potěrový beton s přidáním 40 % objemu odpadu

- 4. záměs = potěrový beton s přidáním 60 % objemu odpadu
- 5. záměs = potěrový beton s přidáním 100 % objemu odpadu

Vyhodnocení experimentu pevností v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 44 dnech zrání:

Z grafu č. 3 je patrné, že i při tomto měření byla zjištěna nejvyšší pevnost v tlaku u 2. záměsi, a to $31,3 \text{ MPa}$. Při tomto měření bylo zjištěno navýšení oproti 1. záměsi o $1,5 \text{ MPa}$. Pevnost v tlaku 1. záměsi byla $29,8 \text{ MPa}$. U zbývajících záměsí opět nastalo výrazné snížení pevnosti v tlaku oproti referenční záměsi. U 3. záměsi nastal pokles o $5,3 \text{ MPa}$ na hodnotu $24,5 \text{ MPa}$. Pevnost v tlaku 4. záměsi byla $16,2 \text{ MPa}$, zde nastalo snížení o $13,6 \text{ MPa}$. Nejnižší hodnota pevnosti v tlaku byla opět zaznamenána u 5. záměsi, tedy u záměsi, kde bylo přidáno nejvyšší množství odpadu a tedy i vody. Zde nastal pokles $18,2 \text{ MPa}$ na hodnotu $11,6 \text{ MPa}$.

6.2.8.3 Zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

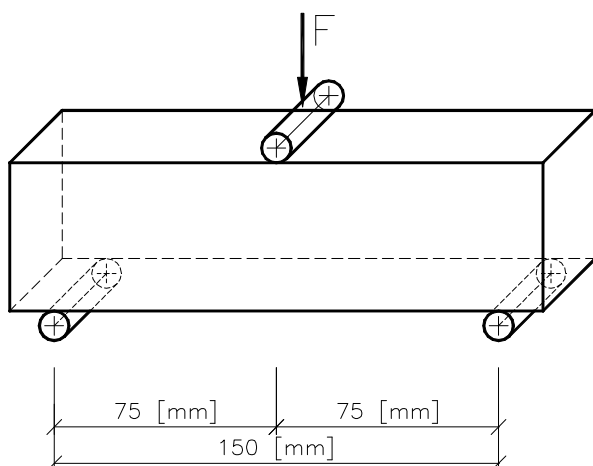
Zkouška byla provedena v souladu s normou [8]. Zkouška byla vykonána po 44 dnech od záměsi betonů z důvodu opravy součástky potřebné k měření pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles.

Zkušební přístroj použitý při zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles:

Při tomto experimentu byl také použit zkušební lis od firmy BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria. Měření však probíhalo v části přístroje, která je na obrázku vyznačena číslem 1. Tento přístroj umožňuje potřebné nastavení rozteče mezi podpěrnými válečky. Vzdálenost mezi těmito válečky byla podle normy [8] a velikostí zkušebního tělesa stanovena na 150 mm . Rychlost zatěžování byla $0,2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$.

Postup zkoušky:

Před vlastní zkouškou byly na tělesech vyznačeny body pro přesné umístění těles na podpěrné válečky. Dále byl na tělesech vyznačen střed těles pro kontrolu působení síly vyvolané zatěžovacím válečkem, která má působit přesně na střed zkušebního tělesa. Umístění tělesa a působení síly je znázorněné na obrázku číslo 20.



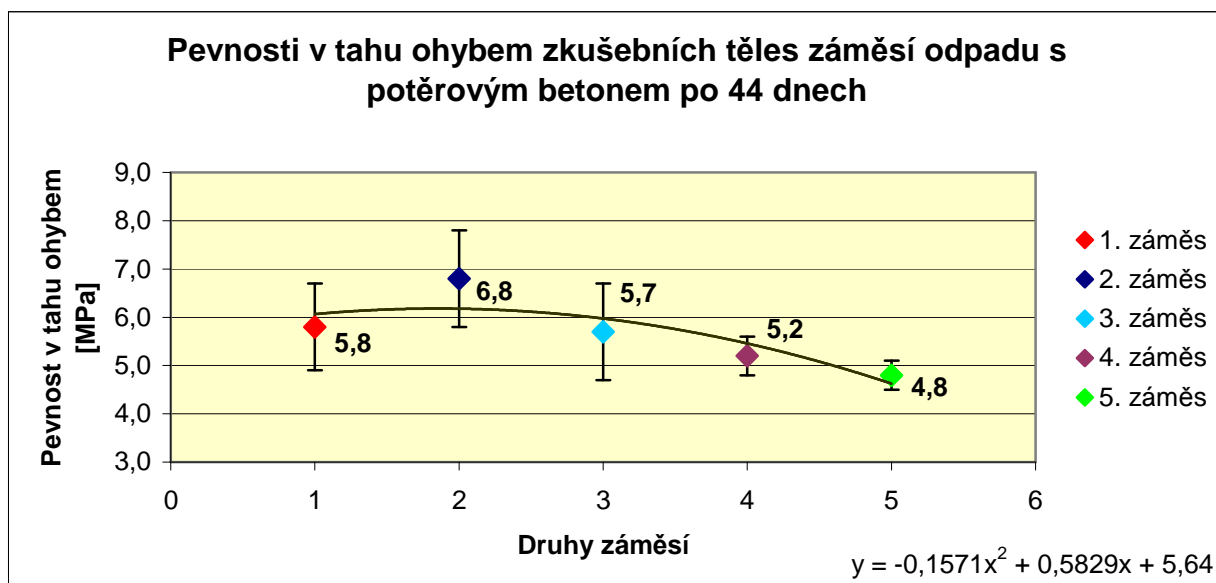
Obr. 20 Působení síly v polovině zkušebního tělesa

Po vložení zkušebního tělesa na podpěrné válečky podle značek následovalo uvedení stroje do chodu. Na obrazovce počítače byla následně zaznamenána maximální dosažená síla [kN], která byla zapotřebí k porušení tělesa. Pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byly následně přepočteny pomocí vztahu (2). Podle normy [8] byly naměřené výsledky zaokrouhleny na nejbližších 0,1 MPa.

Hodnoty pevností v tahu ohybem zkušebních těles byly zprůměrnovány, dále byla vypočtena směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 5. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu č. 4. Data byla proložena polyfonem 2. stupně a dále zde byla zaznamenána rovnice vzniklé regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = potěrový beton bez odpadu
2. záměs = potěrový beton s přidáním 20 % objemu odpadu
3. záměs = potěrový beton s přidáním 40 % objemu odpadu
4. záměs = potěrový beton s přidáním 60 % objemu odpadu
5. záměs = potěrový beton s přidáním 100 % objemu odpadu



Graf 4 Průměrné pevnosti v tahu záměsí potěrového betonu s odpadem po 44 dnech od záměsí

Vyhodnocení experimentu pevností v tahu ohybem zkušebních těles záměsí potěrového betonu s odpadem po 44 dnech zrání:

Nejvyšší pevnost v tahu ohybem zkušebních těles byla zaznamenána u 2. záměsí. Pevnost v ohybu zde byla 6,8 MPa. U této záměsí tedy došlo k navýšení pevnosti oproti záměsí referenční o 1 MPa. Hodnota pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles 1. záměsí byla 5,8 MPa. U 3. záměsí nenastal výrazný pokles pevnosti oproti záměsí referenční. Pevnost zde klesla pouze o 0,1 MPa. Pevnost v ohybu zde byla 5,7 MPa. U 4. záměsí byla vypočtena hodnota pevnosti 5,2 MPa, zde nastal pokles o 0,6 MPa. Nejvyšší pokles pevnosti byl zaznamenán u 5. záměsí. Pokles nastal o 1 MPa. Hodnota pevnosti v tahu zde byla 4,8 MPa. Na obrázku číslo 21 je znázorněno zkušební těleso 5. záměsí po provedené zkoušce s viditelným odpadem čedičové vlny v lomu.



Obr. 21 Detail 5. záměsí s viditelným odpadem čedičové vlny v lomu tělesa

6.3 Záměsi běžného betonu a odpadové čedičové vlny

6.3.1 Běžný beton

Tento beton se skládal z cementu, dvou frakcí kameniva (0/4, 4/8), vody a superplastifikátoru. Byl použit cement typu 42,5 R z cementárny Prachovice. Kamenivo bylo použito z pískovny Čeperka. Jako superplastifikátor bylo použito Glenium, které má v betonu částečně nahradit vodu a zvýšit pevnost.

Základní receptura betonu:

➤ Cement Prachovice 42,5 R	8,6 kg
➤ Kamenivo 0/4 Čeperka	31,2 kg
➤ Kamenivo 4/8 Čeperka	20,9 kg
➤ Glenium	0,103 kg
➤ Voda	5,3 l

6.3.2 Návrh experimentu s běžným betonem

U tohoto experimentu byly navrženy čtyři záměsi. První záměs byla, stejně jako u záměsí potěrového betonu, tvořena pouze základní recepturou betonu. Nebyla zde přidána žádná odpadová čedičová vlna. Tato záměs sloužila jako referenční, porovnávací.

Do dalších záměsí byla přidávána odpadová čedičová vlna ve zvyšujících se objemových poměrech v sytném stavu bez stlačení. Přidané objemy odpadové čedičové vlny byly zvoleny tak, aby nedošlo k navýšení vody. Množství vody bylo přesně dáno základní recepturou. Do všech záměsí se dávalo vždy stejné množství vody, aby nedošlo ke změně vodního součinitele. Při přidávání odpadové čedičové vlny došlo pouze k navýšení dávky superplastifikátoru oproti základní receptuře z důvodu zajištění zpracovatelnosti všech záměsí betonu. Superplastifikátor Glenium byl u všech záměsí, kde byl přidán odpad navýšen o 0,015 kg (15 g).

Při míchání záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou bylo postupováno tak, aby množství namíchaného betonu při jednom míchání v míchačce bylo dostatečné pro vyplnění všech forem jedné záměsi. Dávkování odpadové čedičové vlny bylo podle hmotnosti základní receptury přepočítáno tak, aby poměry korespondovaly s dávkováním u záměsí potěrového betonu a odpadové čedičové vlny. Hmotnost základní

receptury bez vody byla 60,8 kg. Vypočítané hmotnosti odpadu byly převáženy na analytických vahách a dále byly vmíchány do betonové směsi.

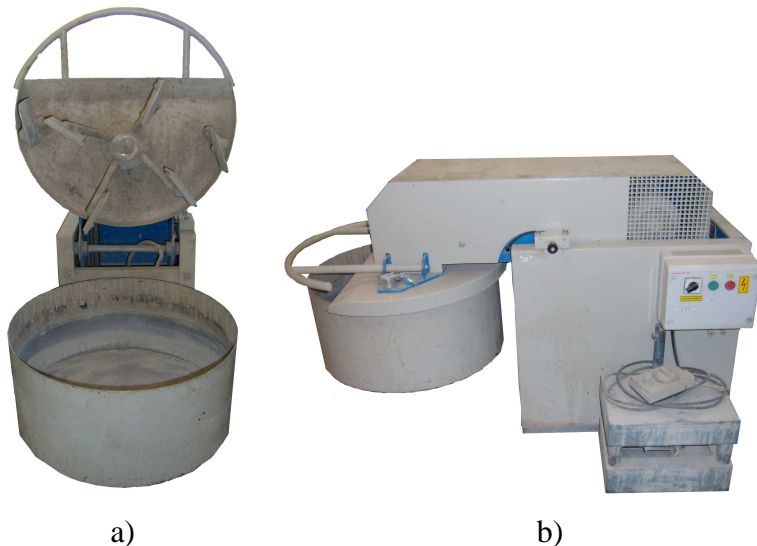
Zkoušky pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles a krychelné pevnosti v tlaku byly dle normy [10] prováděny na jednom souboru betonů, který je tvořen třemi zkušebními tělesy. Měření součinitele tepelné vodivosti bylo prováděno na jednom vzorku od každé záměsi z důvodu nedostatku materiálu a z důvodu kapacity laboratoře pro zkoušení součinitele tepelné vodivosti.

6.3.3 Poměry běžného betonu a odpadu čedičové vlny

- 1. záměs – tato záměs byla vyrobena smícháním všech komponent uvedených v základní receptuře betonu bez přidání odpadu. Vzniklá směs sloužila jako referenční, porovnávací.
- 2. záměs – záměs byla tvořena základní recepturou betonu. Tato receptura byla navýšena o 0,015 kg superplastifikátoru Glenium. Celkem zde bylo použito 0,118 kg Glenia. Dále byl do této záměsi přidán odpad čedičové vlny o objemu **10 %** objemu betonu. Podle hmotnosti betonové směsi bez vody, která vážila 60,8 kg, byla hmotnost objemu u této záměsi stanovena na 0,1875 kg (187,5 g).
- 3. záměs – i tato záměs byla tvořena směsí základní receptury betonu, která byla navýšena o množství plastifikátoru o hmotnost 0,015 kg. Celková váha Glenia byla 0,118 kg. Dále byla tato směs navýšena odpadovou čedičovou vlnou o **20 %** objemu betonu. Váha tohoto objemu byla vypočítána na 0,375 kg (375 g).
- 4. záměs – tato záměs byla tvořena základní recepturou. I zde nastalo navýšení hmotnosti superplastifikátoru o 0,015 kg na hmotnost 0,118 kg. Dále byla záměs navýšena o objem **30 %** objemu betonu. Podle váhy základní receptury betonu bez vody, která byla 60,8 kg byla hmotnost přidaného objemu odpadu vypočítána na 0,5625 kg (562,5 g). Tento poměr byl stanoven za konečný, jelikož při vyšším množství odpadové čedičové vlny by nebylo možné směs dobře promíchat bez přidání většího množství vody oproti původní receptuře. Nastala by tedy nežádoucí změna vodního součinitele.

6.3.4 Míchání záměsí

Záměsí běžného betonu a odpadové čedičové vlny byly míchány ve zkušební laboratoři Qualiform Hradci Králové. K míchání těchto záměsí byla použita míchačka LUCA IC 65. Použitá míchačka je znázorněna na obrázku 22.



Obr. 22 Míchačka LUCA IC 65 použitá při míchání záměsí běžného betonu a odpadové čedičové vlny a) – čelní pohled, b) – pohled z boční strany

Nejprve byla smíchána záměs běžného betonu. Před vlastním mícháním byly potřebné složky betonu přesně zváženy podle základní receptury. Při výrobě této záměsí byly nejprve v míchačce smíchány obě frakce kameniva s cca 1 l vody. Po dokonalém promíchání kameniva byl přidán cement, zbylá voda a superplastifikátor. Směs, která byla tvořena všemi komponentami byla míchána 3 min.

Do dalších záměsí byla postupně přimíchávána i odpadová čedičová vlna ve výše uvedených poměrech. I při tomto míchání bylo nejprve důkladně promícháno kamenivo s cca 1 l vody. Poté se do vzniklé směsi kameniva přidal odpad v určených dávkách, který byl předem zvážen. Přidaný odpad byl společně s kamenivem promíchán. Po důkladném promíchání byl přidán cement, zbylá voda a superplastifikátor. Po přidání zbylých součástí byla směs míchána 3 min. Na obr. 23 je ukázka vmíchání odpadu do běžného betonu.



Obr. 23 Ukázka míchání odpadové čedičové vlny s běžným betonem

6.3.5 Formy

Po promíchání všech záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou byl vzniklý beton umístěn do forem. Formy byly předem vystříkány odformovacím prostředkem Bernium U5, který umožňuje snadnější vyndávání ztvrdlého betonu.

Pro zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byly použity formy zapůjčené od zkušebny Qualiform. Tyto formy jsou určeny pro výrobu zkušebních těles požadovaných zkoušek. Použité formy jsou znázorněny na obrázku 24.

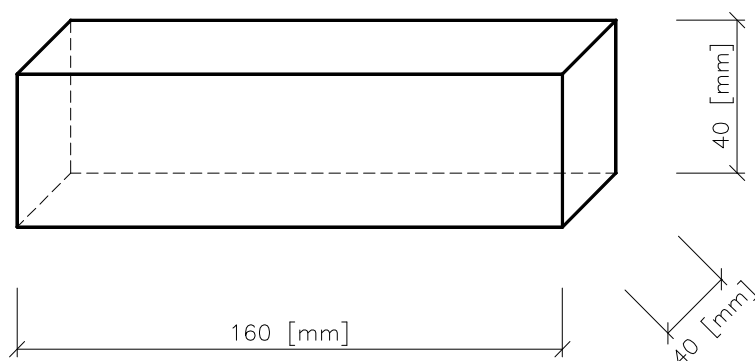


Obr. 24 Formy použité pro záměsí běžného betonu s odpadem čedičové vlny pro zkoušky a) pevnosti v tlaku, b) pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles pro stanovení krychelné pevnosti v tlaku jsou dány normou [7]. Vnitřní rozměry forem byly podle této normy 150*150*150 mm.

Norma pro stanovení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles [8] neuvádí rozměry zkušebních těles, ale pouze jejich poměry. U záměsí běžného betonu a odpadové čedičové vlny byly použity formy o vnitřních rozměrech 40*40*160 mm.

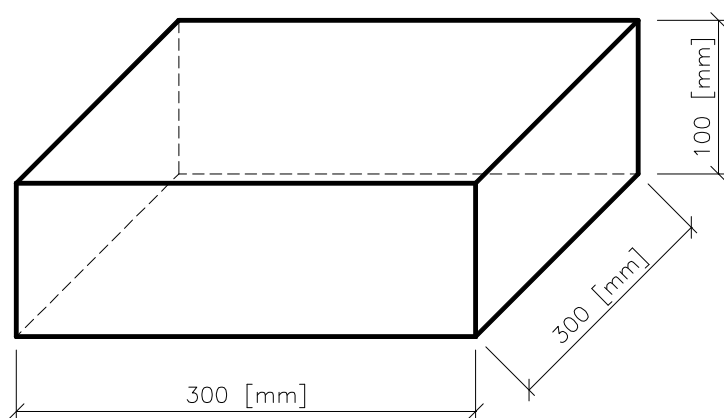
Rozměry těchto zkušebních těles jsou znázorněny na obrázku číslo 25.



Obr. 25 Rozměry těles pro zkoušku pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles záměsí běžného betonu a odpadové čedičové vlny

Pro výrobu těles na měření součinitele tepelné vodivosti byly formy pro svůj netypický rozměr vyrobeny z vodotěsné překližky. Pro snadnější odformování vyrobených těles byly tyto formy spojeny pomocí vrutů. Vnitřní rozměry forem byly 300*300*100 mm.

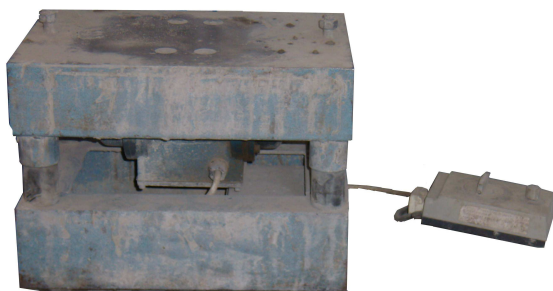
Rozměry těles na měření součinitele tepelné vodivosti jsou znázorněny na obrázku 26.



Obr. 26 Rozměry těles pro měření součinitele tepelné vodivosti

6.3.6 Hutnění

Hutnění bylo u tohoto betonu prováděno metodou vibrování. Přístroj použitý na hutnění betonu metodou vibrování je znázorněn na obrázku 27.



Obr. 27 Přístroj pro hutnění betonu vibrování

6.3.7 Odformování

Odformování těles proběhlo podle doporučení normy [10] po 16 hodinách od jejich výroby.

6.3.8 Zrání vyrobených těles

Zrání těchto zkušebních těles probíhalo stejným způsobem jako u záměsí s potěrovým betonem. Podmínky pro zrání betonu uvádí norma [10]. Tělesa byla uložena po dobu 28 dnů v klimatizované komoře při relativní vlhkosti 100 % a při teplotě 20 °C.

6.3.9 Zkoušky čerstvého betonu prováděné na záměsech běžného betonu s odpadem čedičové vlny

Ihned po promíchání všech vyrobených záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou byly provedeny tři zkoušky čerstvého betonu. Nejprve byla měřena konzistence, dále byla zjišťována objemová hmotnost a obsah vzduchu. U všech záměsí bylo provedeno vždy jedno měření od každé zkoušky. Zjištěné hodnoty z tohoto důvodu nemohly být statisticky zpracovány, ale byly pouze vyneseny do grafů č.5, 6 a 7.

6.3.9.1 Konzistence čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadem

Měření konzistence záměsí čerstvého betonu bylo prováděno metodou sednutí. Zkouška byla prováděna v souladu s normou [4].

Postup zkoušky:

Zkouška byla prováděna pomocí zařízení ve tvaru komolého kužele do kterého byl dán vyrobený čerstvý beton. Beton byl pomocí ocelové tyče zhutněn. Po zhutnění následovalo odejmutí kužele. Sednutí čerstvého betonu bylo změřeno pomocí hutnící ocelové tyče a metru. Princip měření konzistence je znázorněn na obrázku 28, kde je názorně předvedeno umístění pomocného kužele, ocelové tyče a změření sednutí.



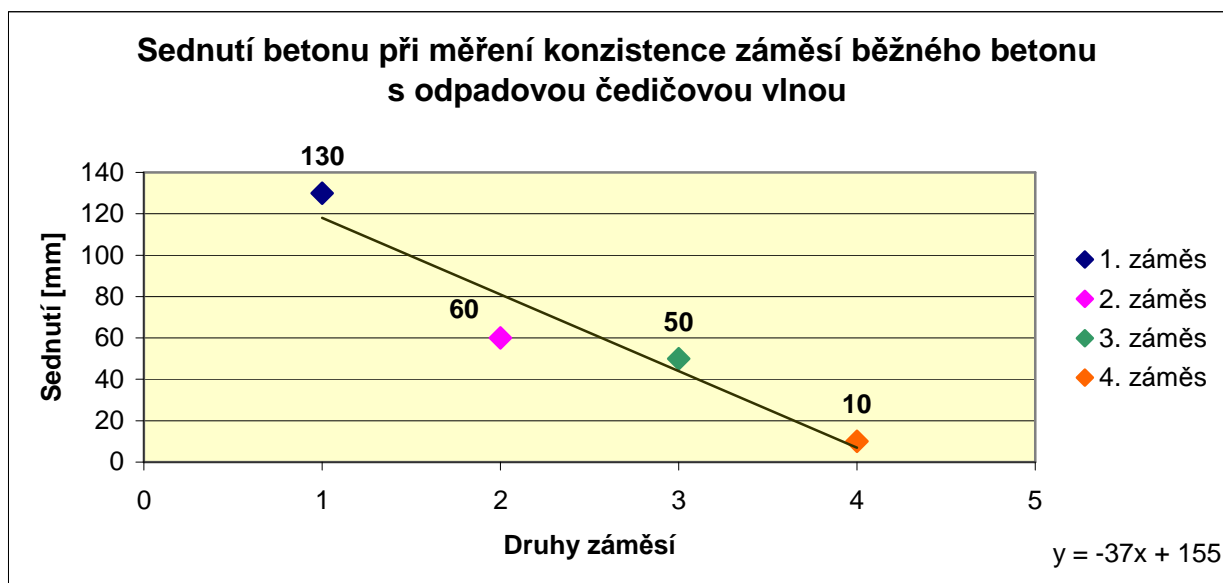
Obr. 28 Měření konzistence běžného betonu bez přidání odpadu čedičové vlny

U všech záměsů bylo změřeno o kolik milimetrů nastalo sednutí čerstvého betonu. Podle zjištěné hodnoty byly jednotlivé záměsi zařazeny do příslušného stupně konzistence dle normy [4]. Norma udává 4 stupně konzistence, a to S1 (sednutí o 10-40 mm), S2 (50-90 mm), S3 (100-150 mm) a S4 (>160mm).

Hodnoty experimentu a zařazení betonů do skupin jsou uvedeny v příloze č. 6. Zjištěné hodnoty sednutí byly vyneseny do grafu č. 5. Mezi data byla proložena regresní přímka a dále zde byla zaznamenána rovnice lineární regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 5 Zjištěné hodnoty sednutí záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou při měření konzistence jednotlivých záměsí.

Vyhodnocení experimentu měření konzistence čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou:

Jelikož byly jednotlivé záměsi vyráběny tak, aby nedošlo k navýšení vody při výrobě a nedošlo tedy ke změně vodního součinitele, nastala předpokládaná změna konzistence u jednotlivých záměsí. U 1. záměsi bylo změřeno sednutí betonu o 130 mm, tento beton byl zařazen podle normy [4] do stupně konzistence S3. Sednutí u druhé záměsi nastalo o 60 mm, proto byl beton klasifikován do třídy S2. Sednutí u třetí záměsi bylo o 50 mm. Tato záměs byla také klasifikována do třídy S2. Pokles u poslední 4. záměsi nastal pouze o 10 mm. Záměs byla zařazena do stupně konzistence S1. Tato skupina betonu vyžaduje intenzivní vibraci.

6.3.9.2 Objemová hmotnost čerstvého betonu záměsí běžného betonu s odpadem

Měření objemové hmotnosti čerstvého betonu bylo prováděno podle normy [5]. Ke zjišťování objemové hmotnosti čerstvého betonu byl použit hrnec, který je součástí přístroje na měření obsahu vzduchu. Hrnec byl použit bez vrchního krytu. Betonová záměs v hrnci byla zhutněna metodou vibrování. Po zhutnění následovalo převážení hrnce s betonem na analytických vahách. Váha byla zaznamenána s přesností na tři desetinná místa. Ze zjištěných vah pak byly vypočítány objemové hmotnosti všech záměsí čerstvého betonu. Výpočet byl proveden podle vzorce (3), který uvádí norma [5], a to:

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3)$$

kde: D - objemová hmotnost čerstvého betonu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

m_2 - hmotnost prázdné nádoby [kg]

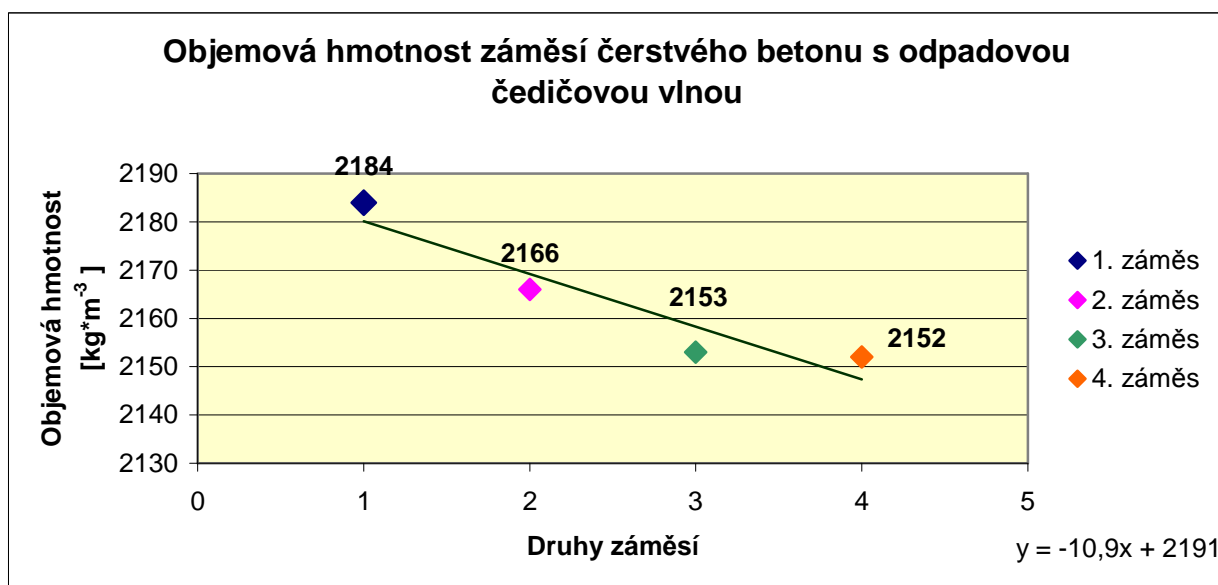
m_1 - hmotnost naplněné nádoby [kg]

V - objem nádoby [m^3]

Praměry vzduchového hrnce:

- hmotnost 4,140 kg
- objem 8,030 m³

Data z tohoto měření jsou uvedena v příloze číslo 6. V grafu č. 6 jsou vyneseny vypočítané hodnoty objemové hmotnosti všech záměsů čerstvého betonu s odpadovou čedičovou vlnou. Naměřená data byla proložena polygonem 1. stupně, do grafu byla zaznamenána rovnice vzniklé regrese.



Graf 6 Vypočítané objemové hmotnosti záměsů čerstvého běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu

3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu

Vyhodnocení experimentu objemových hmotností záměsů čerstvého betonu s odpadem:

Z grafu č.6 je patrné, že se objemové hmotnosti s přibývajícím odpadem v záměsech snižovaly. Nejvyšší objemová hmotnost byla zaznamenána u 1. záměsi. Tato záměs byla tvořena pouze základní recepturou betonu. Objemová hmotnost této záměsi byla vypočítána na $2\,184\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost 2. záměsi, která byla tvořena základní recepturou betonu a 10 % objemu odpadu, byla $2\,166\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Nastal zde pokles oproti záměsi referenční o $18\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U 3. záměsi byl zaznamenán pokles objemové hmotnosti o $31\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ oproti referenční záměsi. Záměs tvořená základní recepturou a 20 % odpadu měla objemovou hmotnost $2\,153\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost poslední, 4. záměsi tvořené běžným betonem a 30 % odpadu byla $2\,152\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Zde nastal pokles o $32\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ oproti objemové hmotnosti referenční záměsi.

6.3.9.3 Obsah vzduchu čerstvého betonu záměsů běžného betonu s odpadem

Ihned po zvážení záměsů betonu, které byly ve vzduchovém hrnci, následovalo změření obsahu vzduchu. Na spodní část hrnce, která byla naplněna zhutnělým čerstvým betonem, byla pevně připevněna část vrchní. Na této části vzduchového hrnce je umístěno zařízení, pomocí kterého byl zjištěn obsah vzduchu v jednotlivých záměsech. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 6. V grafu č. 7 jsou tyto hodnoty vyneseny. Dále byla mezi data v grafu proložena přímka a byla zde zaznamenána rovnice regrese této přímky. Měření bylo prováděno v souladu s normou [6]. Procentuální zastoupení je vztaženo na čerstvý beton po dokončení hutnění.

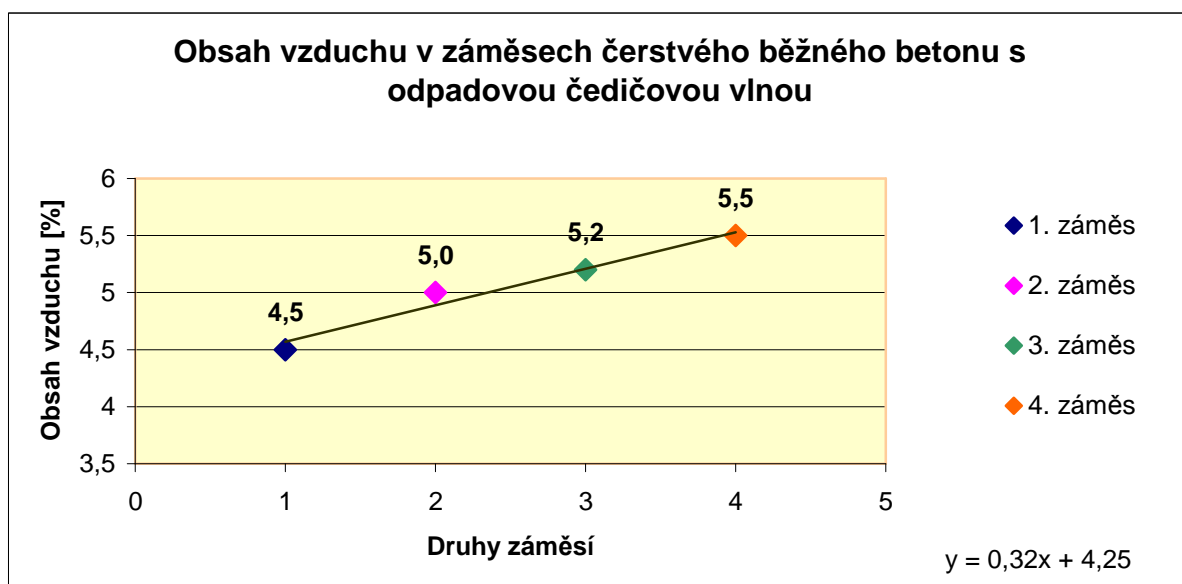


Obr. 29 Vzduchový hrnec

Na obrázku číslo 29 je vzduchový hrnec použitý při zkoumání obsahu vzduchu v záměsech čerstvého betonu.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 7 Obsah vzduchu v jednotlivých záměsech čerstvého běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou.

Vyhodnocení experimentu obsahu vzduchu záměsí čerstvého betonu s odpadem:

Při měření obsahu vzduchu u jednotlivých záměsí byl zaznamenán téměř lineární vzrůstající trend. Tento vzrůstající trend je předpokladem snižování součinitele tepelné vodivosti. U 1. záměsi, která byla referenční a byla tvořena pouze základní recepturou betonu, byl změřen obsah vzduchu 4,5 %. Obsah vzduchu u 2. záměsi byl stanoven na 5 %. Vzduch u 3. záměsi byl 5,2 %. Obsah vzduchu u poslední záměsi, kde bylo přidáno nejvyšší množství odpadové čedičové vlny, byl 5,5 %.

6.3.10 Zkoušky ztvrdlého betonu prováděné na záměsech běžného betonu s odpadem čedičové vlny

U těchto záměsí byla vyrobena zkušební tělesa pro zkoumání krychelné pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles a pro měření součinitele tepelné

vodivosti. Zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byly provedeny na jednom souboru betonů. Soubor betonů je podle normy [10] tvořen třemi zkušebními tělesy. Pro zkoušku měření součinitele tepelné vodivosti byl od každé záměsi vyroben jeden vzorek z důvodu nedostatku materiálu a kapacity laboratoře.

Tělesa určená k zjišťování pevnosti v tlaku, byla před vlastní zkouškou zvážena. Tyto zjištěné hodnoty dále sloužily k výpočtu objemové hmotnosti ztvrdlého betonu u všech vyrobených záměsí. Dále došlo k přeměření těchto krychlí, zjištěné rozměry sloužily k výpočtu výsledné pevnosti v tlaku.

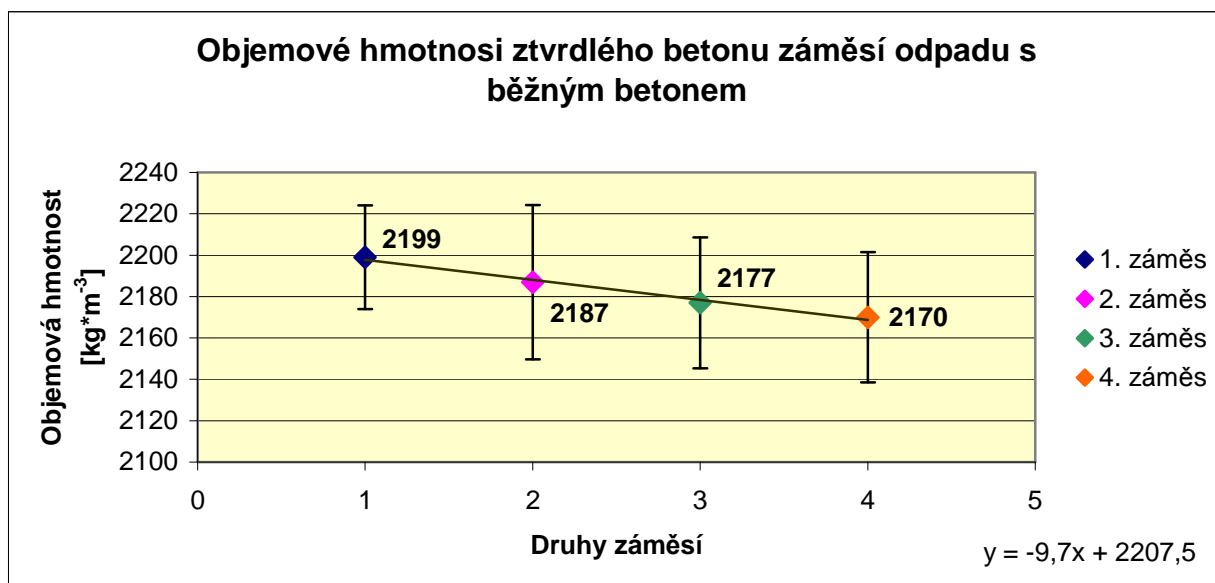
6.3.10.1 Objemová hmotnost ztvrdlého betonu záměsí běžného betonu s odpadem

Stanovení objemové hmotnosti těchto záměsí probíhalo stejným způsobem jako u záměsí odpadové čedičové vlny s potěrovým betonem. Objemová hmotnost byla vypočtena z hmotností zkušebních těles, které byly určeny pro zkoušku pevnosti v tlaku. Tělesa byla zvážena po 28 dnech zrání od jejich výroby. K zjišťování hmotnosti zkušebních těles byla použita analytická váha Mettler Toledo. Hmotnost zkušebních těles byla zaznamenána s přesností na tři desetinná místa.

Vypočítané hodnoty objemových hmotností byly statisticky zpracovány. Z těchto dat byl vypočítán průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Naměřené hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 7. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu č. 8. Data byla proložena regresní přímkou. V grafu je také zaznamenána rovnice vzniklé regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 8 Objemové hmotnosti záměsí ztvrdlého betonu běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Vyhodnocení experimentu objemových hmotností záměsí ztvrdlého betonu běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou:

Z grafu č. 8 je patrné, že se objemové hmotnosti s přibývajícím odpadem v záměsech mírně, téměř lineárně snižovaly. Nejvyšší objemová hmotnost byla zaznamenána u 1. záměsi, která byla tvořena pouze betonovou směsí bez přidání odpadové čedičové vlny. Objemová hmotnost této záměsi byla $2199 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost 2. záměsi tvořené betonovou směsí s přidáním 10 % objemu odpadu byla $2187 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Nastal zde pokles oproti záměsi referenční o $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Pokles objemové hmotnosti u 3. záměsi tvořené betonovou směsí a 20 % objemu odpadu nastal o $22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Objemová hmotnost této záměsi byla vypočítána na $2177 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Poslední 4. záměs, kde bylo do betonové směsi přidáno nejvyšší množství odpadu, měla nejnižší objemovou hmotnost, a to $2170 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. U této záměsi nastal pokles oproti záměsi referenční o $29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

6.3.10.2 Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku

Zkoumání krychelné pevnosti v tlaku probíhalo v souladu s normou [7]. Zkouška byla provedena po 28 dnech zrání dle normy [10].

Zkušební přístroj použitý při zkoumání krychelné pevnosti v tlaku:

Zkouška byla prováděna na stejném zkušebním přístroji jako u záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou. Zkouška proběhla na kalibrovaném zkušebním lisu BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria v akreditované zkušební laboratoři Qualiform v Hradci Králové.

Postup zkoušky byl stejně jako v předcházejícím případě u záměsí s potěrovým betonem prováděn v souladu s normou [7]. Zkušební tělesa byla vkládána do zkušebního lisu na vyznačená místa tak, aby síla působila kolmo na směr hutnění. Rychlost zatěžování byla $0,2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$.

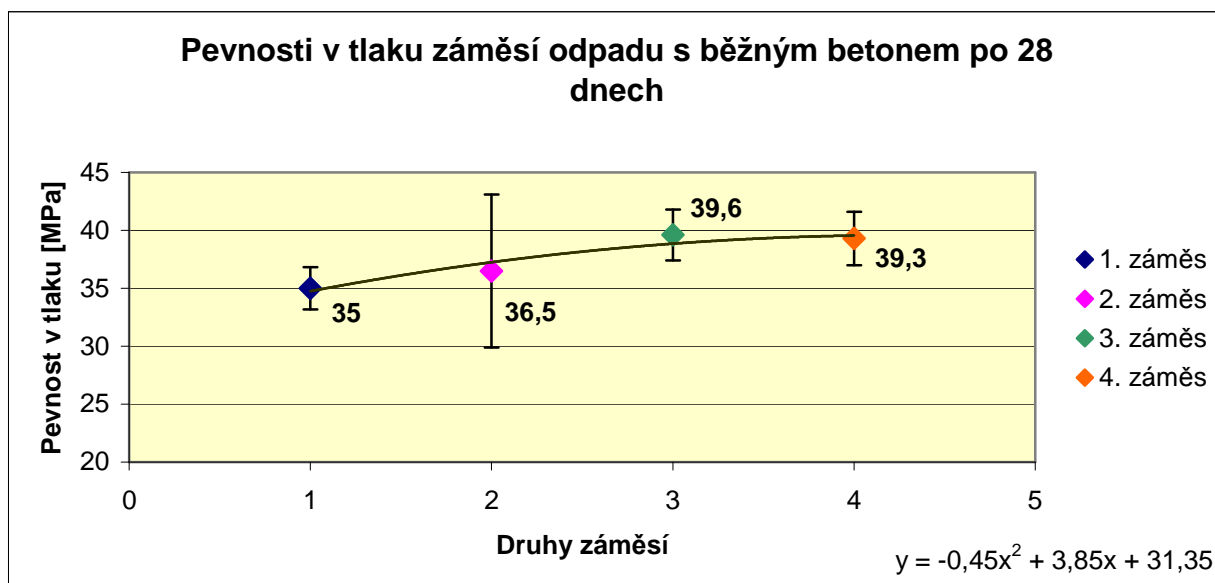
Postup zkoušky:

Před vlastní zkouškou byla zkušební tělesa nejprve zvážena na analytických vahách. Poté následovalo přeměření všech stran krychlí pomocí posuvného měřidla s přesností na celý milimetr. Na zkušebních tělesech byla měřena výška, šířka a délka. Rozměry byly zjišťovány ve stejné poloze jako při výrobě tělesa. Tlačná plocha byla výška*šířka. Zjištěná tlačná plocha sloužila k přepočtu maximální pevnosti v tlaku. Po zvážení a přeměření následovalo vlastní drcení vzorků. Po vložení zkušebního tělesa na přesně vyznačená místa se uvedl přístroj do chodu. Na obrazovce počítače byla následně zaznamenána maximální dosažená síla [kN], která byla zapotřebí k porušení tělesa. Pevnosti v tlaku byly následně přepočteny pomocí vztahu (1). Podle normy [7] byly výsledky zaokrouhleny na nejbližších $0,1 \text{ MPa}$.

Hodnoty pevností v tlaku byly zprůměrnovány, byla vypočtena směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 8. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu č. 9. Mezi vynesená data byl proložen polygon 2. stupně, do grafu byla také zaznamenána rovnice regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 9 Průměrné pevnosti v tlaku záměsí běžného betonu s odpadem po 28 dnech od záměsí

Vyhodnocení experimentu pevností v tlaku záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech zrání:

Z grafu č. 9 je patrné, že nejvyšší pevnost v tlaku byla zjištěna u 3. záměsí. Tato záměs byla tvořena betonovou směsí, která byla navýšena o 20 % objemu odpadu. Průměrná pevnost této záměsí byla 39,6 MPa. Pevnost u referenční záměsí byla 35 MPa. U 3. záměsí vzrostla pevnost v tlaku o 4,6 MPa.

U 2. záměsí tvořené betonovou směsí, která byla navýšena o objem 10 % odpadu byla pevnost v tlaku 36,5 MPa. I zde nastal nárůst pevnosti oproti záměsí referenční (o 1,5 MPa), avšak interval spolehlivosti střední hodnoty u této záměsí byl nejširší. Při tomto měření byly zaznamenány rozdílné hodnoty pevností u jednotlivých zkušebních těles. Tyto rozdílné hodnoty mohou být způsobeny malým množstvím přidaného odpadu, které zapříčiňuje nerovnoměrné rozmístění v celé betonové směsí, a tedy i rozdílné hodnoty pevností.

Nárůst krychelné pevnosti v tlaku u poslední 4. záměsí, kde byla betonová směs navýšena o 30 % objemu odpadu, byl oproti záměsí porovnávací o 4,3 MPa. Průměrná pevnost v tlaku zde byla 39,3 MPa.

6.3.10.3 Zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles

Zkouška byla provedena v souladu s normou [8]. Podle doporučení normy [10] byla zkouška vykonána po 28 dnech od záměsi.

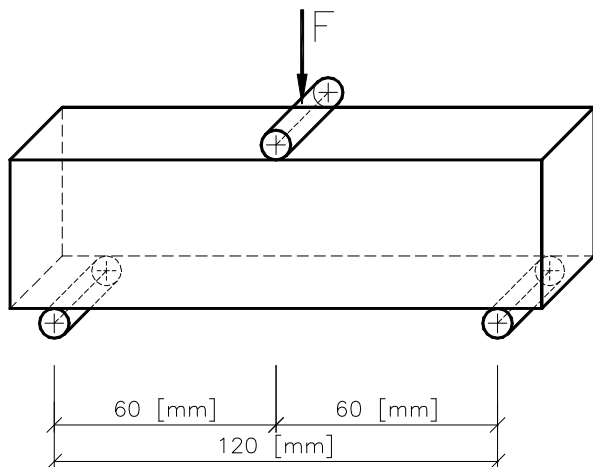
Zkušební přístroj použitý při zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles:

Zkouška byla prováděna na zkušebním lisu od firmy BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria. Přístroj umožňuje nastavení potřebné rozteče mezi podpěrnými válečky. Vzdálenost mezi válečky byla podle normy [8] a velikostí zkušebního tělesa stanovena na 120 mm. Rychlost zatěžování byla $0,2 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$.

Postup zkoušky:

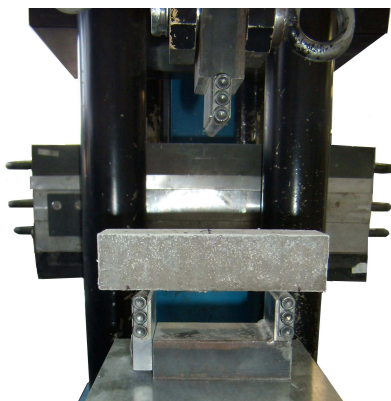
Pro zajištění vysoké přesnosti měření byly na tělesech před vlastní zkouškou vyznačeny body, které sloužily pro přesné umístění tělesa na podpěrné válečky. Na zkušebních tělesech byl také vyznačen střed pro kontrolu působení síly vyvolané zatěžovacím válečkem

Na obrázku 30 je graficky znázorněno umístění zkušebního tělesa na podpěrné válečky a působení síly vyvolané zatěžovacím válečkem.



Obr. 30 Působení síly v polovině zkušebního tělesa

Umístění zkušebního tělesa na podpěrné válečky u zkušebního lisu od firmy BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria je zobrazeno na obrázku číslo 31.



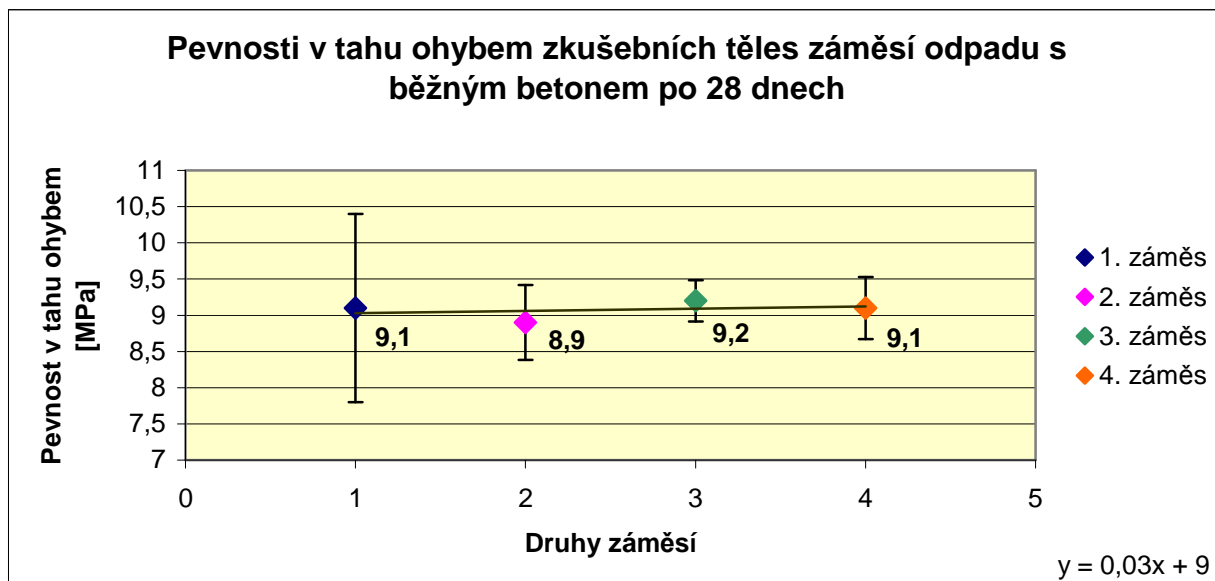
Obr. 31 Umístění zkušebního tělesa u zkušebního lisu od firmy BUEHL+FAUBEL A-1237 Vienna/Austria

Po vložení zkušebního tělesa na podpěrné válečky podle značek následovalo uvedení stroje do chodu. Na obrazovce počítače byla následně zaznamenána maximální dosažená síla [kN], která byla zapotřebí k porušení tělesa. Pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byly následně přepočteny pomocí vztahu (2). Podle normy [8] byly naměřené výsledky zaokrouhleny na nejbližších $0,1 MPa$.

Hodnoty pevností v tahu ohybem zkušebních těles byly statisticky zpracovány. Ze získaných hodnot byl vypočten aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační koeficient a 95% interval spolehlivosti střední hodnoty. Hodnoty a statistické zpracování dat jsou uvedeny v příloze č. 10. Výsledky zkoušky byly vyneseny do grafu č. 10. Vynesená data v grafu byla proložena regresní přímkou a byla zde zaznamenána rovnice regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 10 Průměrné pevnosti v tahu záměsí běžného betonu s odpadem po 28 dnech od záměsí

Vyhodnocení experimentu pevností v tahu ohybem zkušebních těles záměsí běžného betonu s odpadem po 28 dnech zrání:

Při tomto experimentu nebyly zjištěny výrazné změny pevností u jednotlivých záměsí.

Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles u záměsí referenční byla 9,1 *MPa*. U 2. záměsí nastal mírný pokles. Pevnost zde byla 8,9 *MPa*, pokles oproti 1. záměsí nastal o 0,2 *MPa*. Pevnost v tahu zkušebních těles u 3. záměsí byla 9,2 *MPa*. Zde nastalo mírné navýšení pevnosti oproti záměsí porovnávací, zvýšení bylo o 0,1 *MPa*. Pevnost 3. záměsí byla shodná s pevností záměsí referenční, hodnota pevnosti byla 9,1 *MPa*.

6.3.10.4 Měření součinitele tepelné vodivosti λ

Tato zkouška probíhala v souladu s normou [9]. Zkouška byla provedena na tělesech starších 28 dnů. Měření proběhlo ve zkušební laboratoři v Častolovicích.

Zkušební přístroj použitý při měření součinitele tepelné vodivosti:

Měření součinitele tepelné vodivosti bylo provedeno na lambdametru R MATIC². Zkušební přístroj použitý při měření součinitele tepelné vodivosti je zobrazen na obrázku číslo 32.

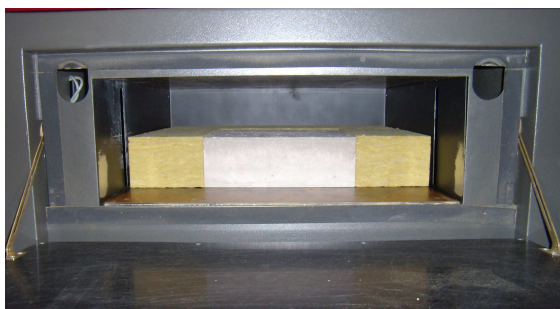


Obr. 32 Lambdametr R MATIC²

Postup zkoušky:

Měření bylo prováděno na jednom vzorku o velikosti $300 \times 300 \times 100 \text{ mm}$ od každé vyrobené záměsi. Z důvodu nedostatku materiálu a z důvodu kapacity laboratoře, byl vyroben a měřen pouze jeden vzorek od každé záměsi, jelikož toto měření bylo časově velice náročné. Z tohoto časového důvodu bylo samotné měření provedeno pracovníky zkušební laboratoře. Vzorky byly před vlastním měřím umístěny v běžném prostředí o relativní vlhkosti cca 55 %.

K měření součinitele tepelné vodivosti na tomto přístroji byly zapotřebí vzorky o velikosti $600 \times 600 \times 100 \text{ mm}$. Pro nedostatek materiálu byly vyrobeny vzorky o menších rozměrech, z tohoto důvodu byl zbylý prostor kolem betonového vzorku umístěného uprostřed měřicí části lamdametru vyplněn deskami z čedičové vlny. Detail umístění betonu uprostřed měřicí části lamdametru a vyplnění zbylého prostoru pomocí čedičové izolace je znázorněn na obrázku číslo 33.

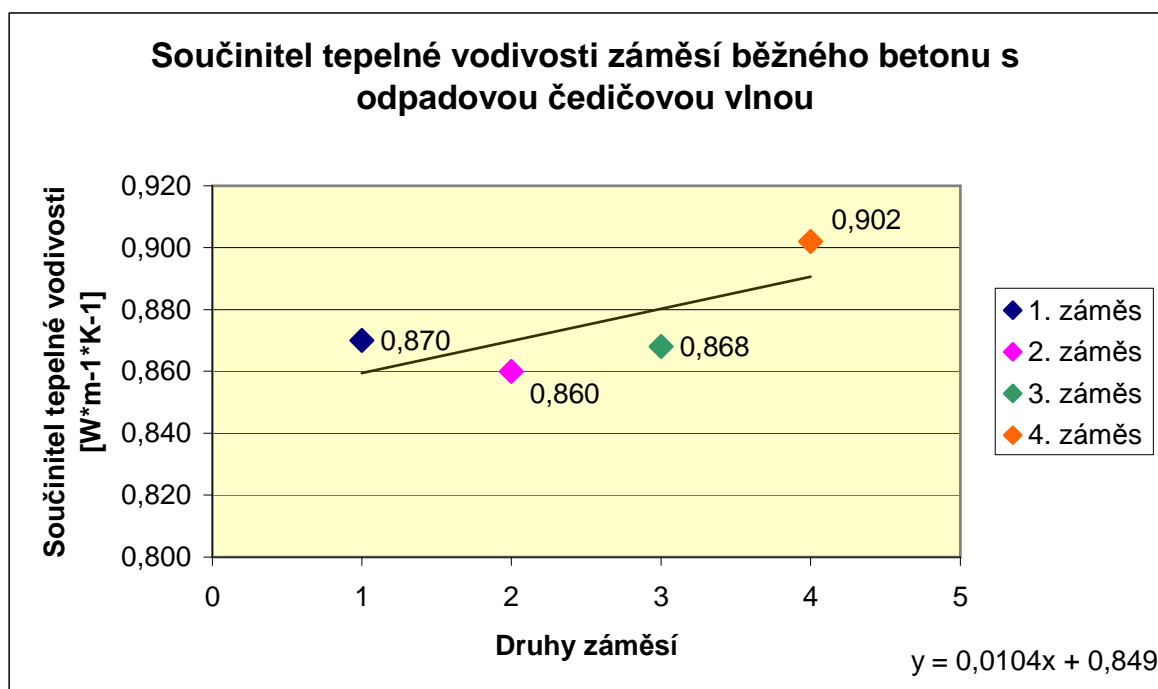


Obr. 33 Detail uložení zkušebního tělesa do lamdametru

Získané naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze číslo 11. Jelikož byl od každé záměsi měřen pouze jeden vzorek, nebyly získané hodnoty statisticky zpracovány. Tyto hodnoty byly pouze vyneseny do grafu. Do grafu byla mezi data proložena regresní přímka a byla zde zaznamenána rovnice vzniklé regrese.

Legenda ke grafu:

1. záměs = běžný beton bez odpadu
2. záměs = běžný beton s přidáním 10 % objemu odpadu
3. záměs = běžný beton s přidáním 20 % objemu odpadu
4. záměs = běžný beton s přidáním 30 % objemu odpadu



Graf 11 Zjištěné hodnoty součinitele tepelné vodivosti záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Vyhodnocení experimentu měření součinitele tepelné vodivosti:

Z grafu č.11 je patrné, že u všech záměsí nebyl splněn předpoklad snižování součinitele tepelné vodivosti u záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

oproti záměsi referenční. Tento předpoklad nastal při měření obsahu vzduchu čerstvého betonu v jednotlivých záměsech, kde s přibývajícím odpadem narůstal obsah vzduchu.

U referenční záměsi, tedy u záměsi tvořené pouze základní recepturou běžného betonu, byla naměřena hodnota součinitele tepelné vodivosti $0,870 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. U 2. a 3. záměsi byl splněn předpoklad snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti oproti záměsi referenční. U 2. záměsi byla naměřena hodnota $0,860 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 3. záměs měla hodnotu součinitele tepelné vodivosti $0,868 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. U poslední 4. záměsi, kde bylo přidáno nejvyšší množství odpadové čedičové vlny, a zároveň zde byl předpoklad nejvyššího snížení součinitele tepelné vodivosti se tato domněnka nepotvrdila. Byla zde zaznamenána hodnota součinitele tepelné vodivosti $0,902 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Nejnižší hodnota součinitele tepelné vodivosti, která je předpokladem nižší schopnosti vést teplo a být tedy lepším tepelným izolantem, byla při tomto měření zaznamenána u 2. záměsi, tedy u záměsi tvořené směsí běžného betonu navýšené o 10 % objemu odpadu.

Jelikož bylo provedeno pouze jedno měření od každé vyrobené záměsi, jsou tyto hodnoty pouze orientační. Pro získání přesnějších výsledků by muselo být provedeno více měření, která by byla následně statisticky zpracována a vyhodnocena.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo najít uplatnění odpadového materiálu z výroby čedičových izolací. V této práci byl experiment navržen tak, že se odpadová čedičová vlna vmíchávala do betonové směsi v různých poměrech. Postupně byly použity dva druhy betonů, a to beton potěrový a beton běžný. U záměsí potěrového betonu byly provedeny zkoušky ztvrdlého betonu, a to zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Výsledky těchto zkoušek sloužily pouze ke stanovení poměrů u záměsí s běžným betonem. Navýšení pevností v tlaku i v tahu ohybem zkušebních těles u záměsí s potěrovým betonem nastalo při navýšení betonové směsi o odpadovou čedičovou vlnu o množství 20 % objemu betonu. Z tohoto důvodu byly dále záměsí běžného betonu navýšeny odpadovou čedičovou vlnou o 10, 20 a 30 % objemu betonu. Toto dávkování bylo také zvoleno pro zachování vodního součinitele, tzn. u těchto záměsí nedošlo k navyšování dávky vody. U záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou byly provedeny zkoušky čerstvého a ztvrdlého betonu. Mezi prováděné zkoušky čerstvého betonu patřily zjišťování objemové hmotnosti, obsah vzduchu a měření konzistence. U ztvrdlého betonu byly prováděny zkoušky krychelné pevnosti v tlaku, pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles a dále byl měřen součinitel tepelné vodivosti.

Ze získaných výsledků je patrné, že s přibývajícím odpadovou čedičovou vlnou nastalo mírné snižování objemových hmotností u jednotlivých záměsí. Při měření konzistence čerstvého betonu nastalo snižování sednutí u záměsí s přibývajícím odpadem. Tzn. že jednotlivé záměsí byly zařazeny do rozdílných konzistenčních tříd. Nejnižší sednutí nastalo u 4. záměsí, do této záměsí bylo přidáno nejvyšší množství odpadové čedičové vlny. 4. záměs byla zařazena do třídy konzistence S1, která vyžaduje intenzivní vibraci, z tohoto důvodu není vhodné používat tuto záměs v běžném provozu. Při měření obsahu vzduchu čerstvého betonu u záměsí běžného betonu s odpadem bylo zaznamenáno zvyšování obsahu vzduchu s přibývajícím odpadem. Zvyšující se obsah vzduchu v záměsech s vyšším obsahem odpadové čedičové vlny byl předpokladem ke snižování součinitele tepelné vodivosti, tedy zvyšování tepelné izolace.

Při zkoušení ztvrdlého betonu záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou byla, stejně jako u záměsí potěrového betonu s odpadem, zjištěna nejvyšší pevnost

v tlaku u záměsi navýšené o 20 % objemu odpadu. Při zkoumání pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byly zjištěny téměř shodné hodnoty u všech zkoumaných záměsích běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou. Při této zkoušce nebylo zaznamenáno výrazné navýšení, ale ani snížení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles u záměsích navýšených o odpad oproti záměsi referenční tvořené pouze směsí běžného betonu. Jako poslední měření ztvrdlého betonu proběhlo zjišťování součinitele tepelné vodivosti. Při měření obsahu vzduchu v jednotlivých záměsech nastal předpoklad snižování součinitele tepelné vodivosti u záměsích tvořených betonovou směsí a odpadem oproti záměsi referenční. Tento předpoklad se však vyplnil pouze u 2. a 3. záměsi. U poslední vyrobené záměsi, kde bylo přidáno nejvyšší množství odpadové čedičové vlny a zároveň zde bylo naměřeno nejvyšší procento obsahu vzduchu se tento předpoklad nenaplnil. Jelikož bylo provedeno vždy jedno měření součinitele tepelné vodivosti od každé vyrobené záměsi, byly tyto zjištěné hodnoty pouze orientační. Pro získání přesnějších hodnot by muselo být vyrobeno a následně změřeno více vzorků od každé záměsi, získaná data by byla následně statisticky zpracována.

Nejlepší výsledky byly zjištěny u záměsi tvořené betonovou směsí (jak potěrovým, tak běžným betonem), která byla navýšena o objem 20 % odpadové čedičové vlny. U záměsi s potěrovým betonem zde byla zaznamenána nejvyšší hodnota pevnosti v tlaku, ale i pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. U záměsi s běžným betonem byla u této záměsi zjištěna nejvyšší krychelná pevnost v tlaku. Při zkoušení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles byla u záměsi běžného betonu s 20 % odpadu oproti záměsi referenční téměř shodná hodnota. U této záměsi nastalo i očekávané snížení hodnoty součinitele tepelné vodivosti oproti záměsi referenční. Tato směs byla tedy lepším tepelným izolantem oproti záměsi porovnávací.

Z vyzkoumaných výsledků plyne doporučení vyvíjení a následné vyrábění záměsích běžného betonu s navýšením 20 % objemu odpadu. Oproti záměsi referenční bylo u této záměsi zjištěno navýšení pevnosti v tlaku, srovnatelná hodnota pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles, snížená hodnota součinitele tepelné vodivosti, ale také mírné snížení objemové hmotnosti. Tato záměs byla zařazena do stupně konzistence S2, což zaručuje dobrou zpracovatelnost čerstvé směsi.

Použitá literatura

- [1] *Basaltex* [online]. 2004 [cit. 2009-11-05]. Zpracování nekonečných čedičových vláken do technických výrobků. Dostupné z WWW: <<http://www.basaltex.cz/>>.
- [2] *Basfiber.com* [online]. 2009 [cit. 2009-11-09]. Basfiber. Dostupné z WWW: <<http://www.basfiber.com/en/basfiber.shtml>>.
- [3] Cibochová, M.: *Distribuce pevnosti čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 1997. 56 s.
- [4] ČSN EN 12350–2 (731301): Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: *Zkouška sednutím*
- [5] ČSN EN 12350–6 (731301): Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: *Objemová hmotnost*
- [6] ČSN EN 12350–7 (731301): Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: *Obsah vzduchu – Tlakové metody*
- [7] ČSN EN 12390 – 3 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: *Pevnost v tlaku zkušebních těles*
- [8] ČSN EN 12390 – 5 (731302): Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: *Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*
- [9] ČSN EN 12667 (730569): *Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu*
- [10] ČSN EN 206 – 1 (732403): Beton – Část 1.: *Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*
- [11] *Delta.fme.vutbr* [online]. 2009 [cit. 2009-11-09]. Kompozity. Dostupné z WWW: <<http://delta.fme.vutbr.cz/mikromechanika/kompozityA4.pdf>>.
- [12] *IMateriály* [online]. 2007-2008 [cit. 2009-10-30]. Polymerní vláknové kompozity . Dostupné z WWW: <<http://www.imaterialy.cz/clanky/plasty-pro-architekturu-a-stavebnictvi-6-recyklace-plastu/2967/plasty-pro-stavebnictvi-a-architekturu-7-polymerni-vlaknove-kompozity/>>.
- [13] *ISOVER* [online]. 2010 [cit. 2010-02-09]. O nás. Dostupné z WWW: <<http://www.isover.cz/o-nas>>.
- [14] Kohoutková, A., Trtík, K., Vašková, J., Vodička, J.: *Betonové konstrukce 1*. Praha: ČVUT 2005. 179 s.

- [15] *Lidová architektura* [online]. 2000-2010 [cit. 2009-11-04]. Čedič, těžba, vlastnosti a použití. Dostupné z WWW: <<http://www.lidova-architektura.cz/A-vyvoj/material-staveb/cedic-kamen.htm>>.
- [16] Lehner, J., Surý, L.: *Silikátová vlákna v průmyslu a stavebnictví*. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1975. 368 s.
- [17] Menšíková, P.: *Chemická odolnost skleněných a čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 61 s.
- [18] Militký, J.: Přednášky: *Textilní vlákna; Speciální vlákna*. Liberec: TU 2005. 423s.
- [19] *Onlinepubs* [online]. 1997 [cit. 2009-11-05]. IDEA Innovations Deserving Exploratory Analysis Project. Dostupné z WWW: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highway/NCHRP02_5_Final_Report.pdf>.
- [20] *Petrografie* [online]. 2009 [cit. 2009-12-21]. Bazalt (čedič). Dostupné z WWW: <<http://petrol.sci.muni.cz/poznavanihornin/magmatity/bazalt.htm>>.
- [21] Ptáčková, K.: *Geometrické parametry kontinuálních čedičových vláken*. Liberec: Diplomová práce, 2007. 68 s.
- [22] *ScienceDirect* [online]. 2005 [cit. 2010-03-17]. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. Dostupné z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TWK-4GC1RR8-1&_user=640831&_coverDate=12%2F31%2F2005&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1254176710&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000034259&_version=1&_urlVersion=0&_userid=640831&md5=91fe04c0ffd47eee05552d49404eff5b>.
- [23] Sedmínková, L.: *Kompozitní materiály s čedičovou vláknennou výztuží*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 103 s.
- [24] *Skripta.ft.tul.cz* [online]. 2009 [cit. 2009-10-26]. Textilní kompozity. Dostupné z WWW: <https://skripta.ft.tul.cz/database/list_aut.cgi?aut=32&skr=44&pro=>>.
- [25] Štěpánková, J.: *Využití pevnosti čedičových vláken ve svazku*. Liberec: Diplomová práce, 2008. 48 s.
- [26] *Weber* [online]. 2009 [cit. 2010-02-11]. Weber.bat potěr jemný 25 MPa. Dostupné z WWW: <<http://www.weber-terranova.cz/vnejsi-fasady-a-omitky/radce-weber/vyrobky/tenkovrstve-pastovite-omitky/weberbat-poter-jemny-25-mpa.html>>.

Seznam příloh

Příloha č. 1 - výsledky zkoušky objemové hmotnosti záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Příloha č. 2 - výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Příloha č. 3 - výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 44 dnech

Příloha č. 4 - ukázky porušení zkušebních krychlí záměsí potěrového betonu a odpadu z čedičové vlny při zkoumání pevností v tlaku

Příloha č. 5 - výsledky zkoušky pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 44 dnech

Příloha č. 6 - výsledky zkoušek čerstvého betonu

Příloha č. 7 - výsledky zkoušky objemové hmotnosti záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Příloha č. 8 - výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Příloha č. 9 - ukázky porušení zkušebních krychlí záměsí běžného betonu a odpadu z čedičové vlny a ukázky správného drcení zkušebních krychlí při zkoumání pevností v tlaku

Příloha č. 10 - výsledky zkoušky pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Příloha č. 11 - výsledky zkoušky z měření součinitele tepelné vodivosti

Příloha č. 12 - statistické zpracování dat

Příloha č. 1

- výsledky zkoušky objemové hmotnosti záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Tab. 5 Výsledek zkoušky 1. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	7,115	2108	150	151	151
2.	7,124	2103	148	150	149
3.	7,094	2106	147	150	149

Tab. 6 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [kg·m ⁻³]	2107
Výběrový rozptyl [(kg·m ⁻³) ²]	25,333
Směrodatná odchylka [kg·m ⁻³]	5,033
Variační koeficient [%]	0,239
95% interval spolehlivosti [kg·m ⁻³]	2094-2120

Tab. 7 Výsledek zkoušky 2. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	7,144	2118	147	151	150
2.	7,130	2099	146	151	151
3.	7,052	2097	147	150	150

Tab. 8 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [kg·m ⁻³]	2106
Výběrový rozptyl [(kg·m ⁻³) ²]	240,333
Směrodatná odchylka [kg·m ⁻³]	15,503
Variační koeficient [%]	0,736
95% interval spolehlivosti [kg·m ⁻³]	2067-2144

Tab. 9 Výsledek zkoušky 3. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	6,783	2010	146	150	151
2.	6,770	2006	145	150	150
3.	6,739	1997	145	150	150

Tab. 10 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2004
Výběrový rozptyl [$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^2$]	44,333
Směrodatná odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	6,658
Variační koeficient [%]	0,332
95% interval spolehlivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1987-2021

Tab. 11 Výsledek zkoušky 4. záměsi

	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
Číslo vzorku	[kg]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	6,686	1981	145	150	150
2.	6,699	1985	145	150	150
3.	5,906	1975	145	151	151

Tab. 12 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1980
Výběrový rozptyl [$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^2$]	25,333
Směrodatná odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	4,033
Variační koeficient [%]	0,254
95% interval spolehlivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1967-1993

Tab. 13 Výsledek zkoušky 5. záměsi

	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
Číslo vzorku	[kg]	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	6,642	1968	147	150	151
2.	6,591	1953	146	151	151
3.	6,689	1982	145	151	151

Tab. 14 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 5. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1968
Výběrový rozptyl [$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^2$]	210,333
Směrodatná odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	14,503
Variační koeficient [%]	0,737
95% interval spolehlivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1932-2004

Příloha č. 2

- výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Tab. 15 Výsledek zkoušky 1. záměsi

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	150	151	151	450,2	19,7
2.	148	150	149	519,4	23,2
3.	147	150	149	501,9	22,5

Tab. 16 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	21,8
Výběrový rozptyl [MPa ²]	3,430
Směrodatná odchylka [MPa]	1,852
Variační koeficient [%]	849,600%
95% interval spolehlivosti [MPa]	17,2-26,4

Tab. 17 Výsledek zkoušky 2. záměsi

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	147	151	150	538,6	23,8
2.	146	151	151	580,1	25,4
3.	147	150	150	517,2	23,0

Tab. 18 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	24,1
Výběrový rozptyl [MPa ²]	1,493
Směrodatná odchylka [MPa]	1,222
Variační koeficient [%]	507,800%
95% interval spolehlivosti [MPa]	21,0-27,1

Tab. 19 Výsledek zkoušky 3. záměsi

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	146	150	151	409,3	18,1
2.	145	150	150	403,4	17,9
3.	145	150	150	369,3	16,4

Tab. 20 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	17,5
Výběrový rozptyl [MPa²]	0,863
Směrodatná odchylka [MPa]	0,929
Variační koeficient [%]	532,000%
95% interval spolehlivosti [MPa]	15,2-19,8

Tab. 21 Výsledek zkoušky 4. záměsi

	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
Číslo vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	145	150	150	323,7	14,5
2.	145	150	150	269,4	12,0
3.	145	151	151	323,0	14,2

Tab. 22 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	13,6
Výběrový rozptyl [MPa²]	1,863
Směrodatná odchylka [MPa]	1,365
Variační koeficient [%]	1006,200%
95% interval spolehlivosti [MPa]	10,2-17,0

Tab. 23 Výsledek zkoušky 5. záměsi

	Výška	Šířka	Délka	Max.síla v tlaku	Pevnost v tlaku
Číslo vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	147	150	151	266,2	11,8
2.	146	151	151	196,5	8,6
3.	145	151	151	252,1	11,1

Tab. 24 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 5. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	10,5
Výběrový rozptyl [MPa²]	2,830
Směrodatná odchylka [MPa]	1,682
Variační koeficient [%]	1602,200%
95% interval spolehlivosti [MPa]	6,3-14,7

Příloha č. 3

- výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 44 dnech

Tab. 25 Výsledek zkoušky 1. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	7,185	150	151	150	680,3	30,0
2.	7,157	151	150	151	650,8	28,7
3.	7,159	149	150	150	692,1	30,8

Tab. 26. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	29,8
Výběrový rozptyl [MPa ²]	1,123
Směrodatná odchylka [MPa]	1,060
Variační koeficient [%]	3,553
95% interval spolehlivosti [MPa]	27,2-32,4

Tab. 27. Výsledek zkoušky 2. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	7,089	150	151	146	694,3	31,5
2.	7,083	152	151	147	670,4	30,2
3.	7,089	151	150	147	708,3	32,1

Tab. 28. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	31,3
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,943
Směrodatná odchylka [MPa]	0,971
Variační koeficient [%]	3,106
95% interval spolehlivosti [MPa]	28,9-33,7

Tab. 29. Výsledek zkoušky 3. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	6,72	149	149	144	514,3	24,0
2.	6,913	149	151	146	613,2	27,8
3.	6,989	151	150	146	537,4	24,5

Tab. 30. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	25,4
Výběrový rozptyl [MPa²]	4,263
Směrodatná odchylka [MPa]	2,065
Variační koeficient [%]	8,118
95% interval spolehlivosti [MPa]	20,3-30,5

Tab. 31. Výsledek zkoušky 4. záměsi

	Hmotnost	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
Číslo vzorku	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	6,759	151	152	145	380,1	17,2
2.	6,778	151	150	146	258,0	11,8
3.	6,703	151	150	145	427,0	19,6

Tab. 32. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	16,2
Výběrový rozptyl [MPa²]	15,960
Směrodatná odchylka [MPa]	3,995
Variační koeficient [%]	24,660
95% interval spolehlivosti [MPa]	6,3-26,1

Tab. 33. Výsledek zkoušky 5. záměsi

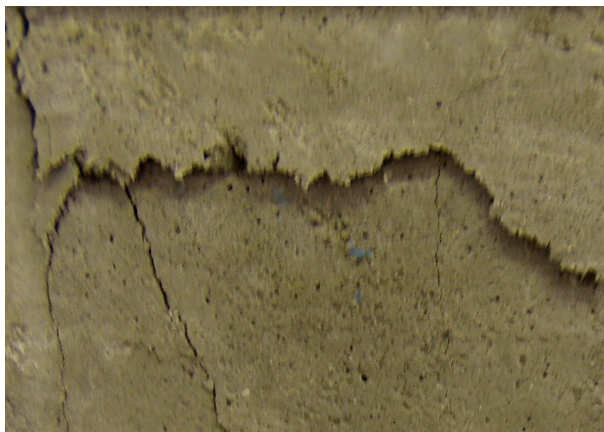
	Hmotnost	Výška	Šířka	Délka	Max.síla v tlaku	Pevnost v tlaku
Číslo vzorku	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	6,573	150	152	148	237,8	10,6
2.	6,629	151	150	145	279,5	12,9
3.	6,703	151	151	147	251,3	11,3

Tab. 34. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 5. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	11,6
Výběrový rozptyl [MPa²]	1,390
Směrodatná odchylka [MPa]	1,179
Variační koeficient [%]	10,164
95% interval spolehlivosti [MPa]	8,7-14,5

Příloha č. 4

- ukázky porušení zkušebních krychlí záměsí potěrového betonu a odpadu z čedičové vlny
při zkoumání pevností v tlaku



Obr. 34 Porušení zkušební krychle u 1. záměsi



Obr. 35 Porušení zkušební krychle u 2. záměsi



Obr. 36 Porušení zkušební krychle u 3. záměsi



Obr. 37 Porušení zkušební krychle u 4. záměsi



Obr. 38 Porušení zkušební krychle u 5. záměsi

Příloha č. 5

- výsledky zkoušky pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles záměsí potěrového betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 44 dnech

Tab. 35. Výsledek zkoušky 1. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,050	5,5
2.	3,240	5,8
3.	3,470	6,2

Tab. 36. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměsi

Zpracování dat pevností v tahu ohybem:	
Průměrná hodnota [MPa]	5,8
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,123
Směrodatná odchylka [MPa]	0,351
Variační koeficient [%]	6,020
95% interval spolehlivosti [MPa]	4,9-6,7

Tab. 37. Výsledek zkoušky 2. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,660	6,6
2.	3,660	6,6
3.	4,070	7,3

Tab. 38. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměsi

Zpracování dat pevností v tahu ohybem:	
Průměrná hodnota [MPa]	6,8
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,163
Směrodatná odchylka [MPa]	0,404
Variační koeficient [%]	5,914
95% interval spolehlivosti [MPa]	5,8-7,8

Tab. 39. Výsledek zkoušky 3. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	2,920	5,3
2.	3,180	5,7
3.	3,390	6,1

Tab. 40. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat pevností v tahu ohybem:
Průměrná hodnota [MPa]	5,7
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,160
Směrodatná odchylka [MPa]	0,400
Variační koeficient [%]	7,018
95% interval spolehlivosti [MPa]	4,7-6,7

Tab. 41. Výsledek zkoušky 4. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	2,980	5,3
2.	2,790	5,0
3.	2,950	5,3

Tab. 42. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat pevností v tahu ohybem:
Průměrná hodnota [MPa]	5,2
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,030
Směrodatná odchylka [MPa]	0,173
Variační koeficient [%]	3,331
95% interval spolehlivosti [MPa]	4,8-5,6

Tab. 43. Výsledek zkoušky 5. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	2,720	4,9
2.	2,630	4,7
3.	2,660	4,8

Tab. 44. Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 5. záměsi

	Zpracování dat pevností v tahu ohybem:
Průměrná hodnota [MPa]	4,8
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,010
Směrodatná odchylka [MPa]	0,100
Variační koeficient [%]	2,083
95% interval spolehlivosti [MPa]	4,6-5,0

Příloha č. 6

- výsledky zkoušek čerstvého betonu

Tab. 45 Naměřené hodnoty konzistence jednotlivých záměsí

Druh záměsí	Sednutí čerstvého betonu	Zařazení do stupně konzistence
	[mm]	
1.záměs	130	S3
2.záměs	60	S2
3.záměs	50	S2
4.záměs	10	S1

Tab. 46 Vypočtené hodnoty objemové hmotnosti čerstvého betonu u záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Druh záměsí	Vypočítaná objemová hmotnost záměsí čerstvého betonu
	[kg*m ⁻³]
1.záměs	2184
2.záměs	2166
3.záměs	2153
4.záměs	2152

Tab. 47 Naměřené hodnoty obsahu vzduchu čerstvého betonu z záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou

Druh záměsí	Naměřený obsah vzduchu záměsí čerstvého betonu
	[%]
1.záměs	4,5
2.záměs	5,0
3.záměs	5,2
4.záměs	5,5

Příloha č. 7

- výsledky zkoušky objemové hmotnosti záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Tab. 48 Výsledek zkoušky 1. záměši

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	7,391	2190	149	149	150
2.	7,459	2210	149	149	149
3.	7,418	2198	150	150	148

Tab. 49 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměši

Zpracování dat objemových hmotností:	
Průměrná hodnota [kg·m ⁻³]	2199
Výběrový rozptyl [(kg·m ⁻³) ²]	101,333
Směrodatná odchylka [kg·m ⁻³]	10,066
Variační koeficient [%]	0,458
95% interval spolehlivosti [kg·m ⁻³]	2174-2224

Tab. 50 Výsledek zkoušky 2. záměši

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	7,436	2203	149	149	147
2.	7,374	2185	149	150	148
3.	7,333	2173	150	150	151

Tab. 51 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměši

Zpracování dat objemových hmotností:	
Průměrná hodnota [kg·m ⁻³]	2187
Výběrový rozptyl [(kg·m ⁻³) ²]	228,000
Směrodatná odchylka [kg·m ⁻³]	15,010
Variační koeficient [%]	0,690
95% interval spolehlivosti [kg·m ⁻³]	2150-2224

Tab. 52 Výsledek zkoušky 3. záměši

Číslo vzorku	Hmotnost	Objemová hmotnost	Výška	Šířka	Délka
	[kg]	[kg·m ⁻³]	[mm]	[mm]	[mm]
1.	7,305	2167	149	149	148
2.	7,382	2187	150	150	148
3.	7,425	2185	150	150	151

Tab. 53 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2177
Výběrový rozptyl [$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^2$]	162,333
Směrodatná odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	12,741
Variační koeficient [%]	0,585
95% interval spolehlivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2145-2209

Tab. 54 Výsledek zkoušky 4. záměsi

Číslo vzorku	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]
1.	7,277	2156	150	150	151
2.	7,341	2175	150	150	149
3.	7,357	2180	150	150	149

Tab. 55 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat objemových hmotností:
Průměrná hodnota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2170
Výběrový rozptyl [$(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})^2$]	160,333
Směrodatná odchylka [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	12,662
Variační koeficient [%]	0,584
95% interval spolehlivosti [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2139,2201

Příloha č. 8

- výsledky zkoušky krychelné pevnosti v tlaku záměsí běžného betonu s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Tab. 56 Výsledek zkoušky 1. záměsi

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	149	149	150	768,1	34,4
2.	149	149	149	770,1	34,7
3.	150	150	148	793,8	35,8

Tab. 57 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	35,0
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,543
Směrodatná odchylka [MPa]	0,737
Variační koeficient [%]	2,108
95% interval spolehlivosti [MPa]	33,2-36,8

Tab. 58 Výsledek zkoušky 2. záměsi.

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	149	149	147	739,2	33,7
2.	149	150	148	815,8	36,7
3.	150	150	151	880,9	39,0

Tab. 59 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměsi

Zpracování dat pevností v tlaku:	
Průměrná hodnota [MPa]	36,5
Výběrový rozptyl [MPa ²]	7,063
Směrodatná odchylka [MPa]	2,658
Variační koeficient [%]	7,288
95% interval spolehlivosti [MPa]	29,9-43,2

Tab. 60 Výsledek zkoušky 3. záměsi

Číslo vzorku	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	149	149	148	888,3	40,3
2.	150	150	148	885,8	39,9
3.	150	150	151	874,8	38,6

Tab. 61 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	39,6
Výběrový rozptyl [MPa²]	0,790
Směrodatná odchylka [MPa]	0,889
Variační koeficient [%]	2,244
95% interval spolehlivosti [MPa]	37,4-41,8

Tab. 62 Výsledek zkoušky 4. záměsi

	Výška	Šířka	Délka	Max. síla v tlaku	Pevnost v tlaku
Číslo vzorku	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
1.	150	150	151	867,9	38,3
2.	150	150	149	885,3	39,6
3.	150	150	149	895,5	40,1

Tab. 63 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat pevností v tlaku:
Průměrná hodnota [MPa]	39,3
Výběrový rozptyl [MPa²]	0,863
Směrodatná odchylka [MPa]	0,929
Variační koeficient [%]	2,362
95% interval spolehlivosti [MPa]	37,0-39,0

Příloha č. 9

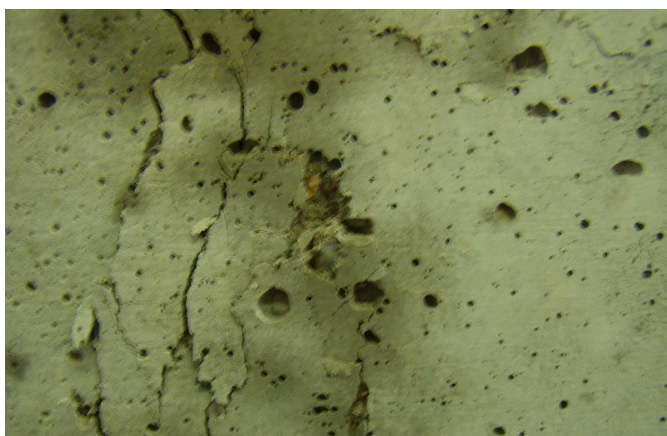
- ukázky porušení zkušebních krychlí záměsí běžného betonu a odpadu z čedičové vlny a ukázky správného drcení zkušebních krychlí při zkoumání pevností v tlaku



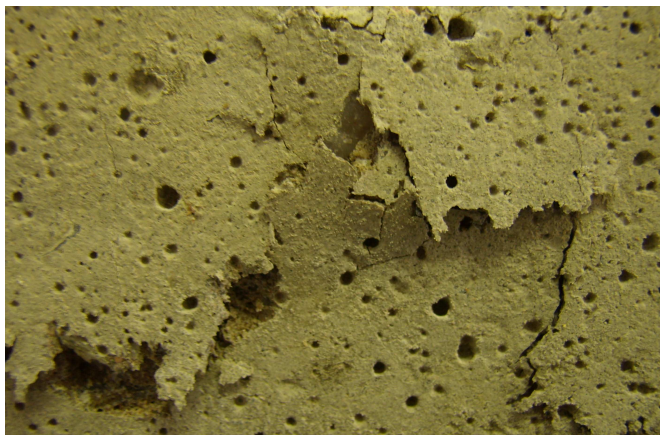
Obr. 39 Porušení zkušební krychle u 1. záměsi



Obr. 40 Porušení zkušební krychle u 2. záměsi



Obr. 41 Porušení zkušební krychle u 3. záměsi



Obr. 42 Porušení zkušební krychle u 4. záměsi



Obr. 43 Správné drcení krychle

Příloha č. 10

- výsledky zkoušky pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles záměsí běžného betonu
s odpadovou čedičovou vlnou po 28 dnech

Tab. 64 Výsledek zkoušky 1. záměši

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,330	9,4
2.	2,970	8,4
3.	3,390	9,5

Tab. 65 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 1. záměši

Zpracování dat pevností v tahu ohybem:	
Průměrná hodnota [MPa]	9,1
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,370
Směrodatná odchylka [MPa]	0,608
Variační koeficient [%]	6,684
95% interval spolehlivosti [MPa]	7,6-10,6

Tab. 66 Výsledek zkoušky 2. záměši

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,120	8,8
2.	3,090	8,7
3.	3,220	9,1

Tab. 67 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 2. záměši

Zpracování dat pevností v tahu ohybem:	
Průměrná hodnota [MPa]	8,9
Výběrový rozptyl [MPa ²]	0,043
Směrodatná odchylka [MPa]	0,208
Variační koeficient [%]	2,348
95% interval spolehlivosti [MPa]	8,4-9,4

Tab. 68 Výsledek zkoušky 3. záměši

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,300	9,3
2.	3,320	9,3
3.	3,240	9,1

Tab. 69 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 3. záměsi

	Zpracování dat pevností v tahu ohybem:
Průměrná hodnota [MPa]	9,2
Výběrový rozptyl [MPa²]	0,013
Směrodatná odchylka [MPa]	0,115
Variační koeficient [%]	1,251
95% interval spolehlivosti [MPa]	8,9-9,5

Tab. 70 Výsledek zkoušky 4. záměsi

Číslo vzorku	Max. dosažená síla při ohybu	Pevnost v tahu ohybem
	[kN]	[MPa]
1.	3,200	9,0
2.	3,200	9,0
3.	3,310	9,3

Tab. 71 Statistické zpracování dat výsledků zkoušky 4. záměsi

	Zpracování dat pevností v tahu ohybem:
Průměrná hodnota [MPa]	9,1
Výběrový rozptyl [MPa²]	0,030
Směrodatná odchylka [MPa]	0,173
Variační koeficient [%]	1,903
95% interval spolehlivosti [MPa]	8,7-9,5

Příloha č. 11

- výsledky zkoušky z měření součinitele tepelné vodivosti

Tab. 72 Naměřené hodnoty součinitele tepelné vodivosti

Druh záměsi	Naměřený součinitel tepelné vodivosti
	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
1. záměs	0,870
2. záměs	0,860
3. záměs	0,868
4. záměs	0,902

Příloha č. 12

- statistické zpracování dat

Aritmetický průměr – průměrná hodnota z vybrané řady naměřených dat. Počítá se podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

Výběrový rozptyl - udává kolísání naměřených hodnot okolo průměrné hodnoty v kvadratických jednotkách. Počítá se podle vztahu:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5)$$

Směrodatná odchylka – je to odmocnina z výběrového rozptylu, udává kolísání naměřených hodnot okolo průměrné hodnoty v absolutních jednotkách. Počítá se podle vztahu:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (6)$$

Variační koeficient – vyjádření nestejnoměrnosti. Je to kolísání hodnot v procentech. Počítá se podle vztahu:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} * 10^2 \quad [\%] \quad (7)$$

95% interval spolehlivosti střední hodnoty – interval, který udává s 95% pravděpodobností všechny možné průměrné hodnoty. Počítá se podle vztahu:

$$95\% IS = \bar{x} \pm t_{0,025} (n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$